

INJEÇÃO DE JUNTAS DE CONTRAÇÃO DE BARRAGENS ABÓBADA

JORGE MIGUEL RIBEIRO MOREIRA DA SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Professor Associado Convidado, Engenheiro Domingos Manuel Ribeiro da
Silva de Matos

SETEMBRO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais e irmã

“What the mind can conceive and believe, it can achieve.”

Napoleon Hill

AGRADECIMENTOS

Gostaria de prestar um sincero agradecimento pela disponibilidade e apoio prestado a todos aqueles que contribuíram de forma incidente na realização deste trabalho, e de forma peculiar:

Ao Professor Domingos Silva de Matos, pelo apoio constante, pelos importantes ensinamentos, pelo incentivo e dedicação demonstrada durante o desenvolvimento deste trabalho como orientador, contribuindo efetivamente para a sua realização.

Ao Engenheiro Diogo Botelho que se demonstrou sempre disponível a colaborar de forma exímia no meu processo de aprendizagem e no esclarecimento de dúvidas referentes quer do programa ANSYS quer do trabalho propriamente dito.

Ao professor e amigo António Bessa, pela estima e pela disponibilidade demonstrada ao longo deste trabalho.

À EDP pelo fornecimento de dados importantes para a realização do trabalho e pela possibilidade de comparação de resultados referentes à observação e modelação da Barragem do Alto Lindoso.

À minha namorada pelo incentivo e carinho.

Aos meus colegas e amigos que me acompanharam de forma íntegra ao longo do percurso académico.

Gostaria de agradecer de forma lisonjeada à minha família. Com especial apreço aos meus pais e irmã pela confiança e espírito de união transmitido, que foram muito importantes no presente trabalho.

RESUMO

O presente trabalho visa analisar o processo e sequência de injeção das juntas de contração de barragens abóbada. Tomou-se como exemplo o caso da Barragem do Alto Lindoso, para a qual se procedeu à sua modelação e respetiva metodologia de cálculo, simulando o processo de injeção de juntas e simulando quer a ação do peso próprio, quer a ação da pressão hidrostática para diferentes níveis de enchimento da albufeira, através do programa ANSYS.

Esta dissertação deu continuidade a um programa desenvolvido pela EDP, com o objetivo de implementar, de forma automática em linguagem APDL (ANSYS Parametric Design Language), todo o processo laborioso desde a definição da geometria e dos parâmetros intrínsecos à barragem até metodologia de cálculo utilizada.

O processo de injeção de juntas de contração da Barragem do Alto Lindoso foi simulado, utilizando diferentes estratégias de injeção, analisando-se as pressões de injeção, os deslocamentos radiais dos blocos centrais da barragem, os valores das tensões principais máxima e mínima, bem como as tensões horizontais no arco e verticais instaladas no corpo da barragem.

Neste trabalho é salientado de forma descritiva aspetos relacionados com a classificação genérica das barragens, o tipo de ações/solicitações que podem atuar no conjunto barragem-fundação, o processo de refrigeração de barragens de betão e o processo de injeção das juntas de contração de barragens abóbada, a realizar antes do primeiro enchimento da albufeira.

Tendo-se efetuado a análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos, apresenta-se também a sua formulação geral, e de forma mais pormenorizada, efetua-se um estudo relativo aos elementos sólidos tridimensionais e aos elementos finitos de junta, que foram utilizados na modelação da barragem e nas análises efectuadas.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem Abóbada, Refrigeração de Barragens de Betão, Injeção de Juntas de Contração, Barragem do Alto Lindoso, Método dos Elementos Finitos

ABSTRACT

This study aims to analyze the contraction joints grouting process and sequence in arch dams. Having as an example the Alto Lindoso Dam, it was presented the respective modeling and calculation's methodology, simulating both the joints' injection process and the action of its own weight as well as hydrostatic pressure's action for different levels of reservoir filling through ANSYS 14.5 (software program).

This Master Thesis gave continuity to a program developed by EDP, and it aims to implement, a code of automatic calculation language APDL (ANSYS Parametric Design Language), the laboured process from defining the structure's geometry and the dam's intrinsic parameters to the calculation's methodology.

The contraction joints' injection process for Alto Lindoso Dam was simulated, by using different injection strategies, analyzing the injection pressures to be applied, the radial displacement of the dam's central blocks, the maximum and minimum principal stresses' values as well as the tensions within the horizontal arch and vertical installed in the dam's body.

On this study, the descriptive aspects related to the dam's generic classification, the type of actions that can act within the dam-foundation set, the concrete dam's cooling process and the arch dams' contraction joints process to be held before the first reservoir filling are highlighted.

The structural analysis was based on the Finite Elements' Method, and the general formulation was presented. A detailed analysis was performed afterwards, where a study on the three-dimensional solid and the joints' finite elements was conducted, used for both the dam's modeling and all other analysis.

KEYWORDS: Arch Dams, Concrete Dams Cooling, Contraction Joints Grouting, Alto Lindoso Dam, Finite Element Method.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3. DESCRIÇÃO SUMÁRIA DOS CAPÍTULOS	2
 2. BARRAGENS DE BETÃO	 5
2.1. CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS	5
2.2. PRINCIPAIS TIPOS ESTRUTURAIS DE BARRAGENS	6
2.2.1. BARRAGENS DE BETÃO	7
2.2.2. BARRAGENS DE ÁTERRO	12
2.3. TECNOLOGIAS DE CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS DE BETÃO	14
2.3.1. ASPETOS CONSTRUTIVOS ENTRE BETÕES CONVENCIONAIS & BETÕES COMPACTADOS COM CILINDROS	14
2.3.2. COMPOSIÇÃO E CONSISTÊNCIA DOS BETÕES	16
2.3.3. JUNTAS DE CONTRAÇÃO EM BETÕES CONVENCIONAIS & BETÕES COMPACTADOS COM CILINDROS	16
2.4. ASPETOS DE PROJETO	17
2.5. AÇÕES ATUANTES EM BARRAGENS DE BETÃO	19
2.5.1. AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	20
2.5.2. AÇÃO DA PRESSÃO HIDROSTÁTICA	20
2.5.3. AÇÕES DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	21
2.5.4. AÇÃO SÍSMICA	21
2.5.5. AÇÕES DAS EXPANSÕES	22
2.5.6. OUTROS FENÓMENOS	22
2.5.7. COMBINAÇÃO DE AÇÕES / CENÁRIOS	23
2.6. DEFINIÇÃO GEOMÉTRICA DAS BARRAGENS ABÓBADA	24
 3. REFRIGERAÇÃO DE BARRAGENS DE BETÃO	 27

3.1. CONSIDERAÇÕES INTRODUTÓRIAS	27
3.2. MÉTODOS DE ARREFECIMENTO DO BETÃO	27
3.3. SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO ARTIFICIAL DE UMA BARRAGEM DE BETÃO	28
3.4. TEMPERATURA DO BETÃO FRESCO	29
3.5. PÓS-REFRIGERAÇÃO	30
3.6. PROGRAMAÇÃO E MONITORIZAÇÃO DO PROCESSO DE REFRIGERAÇÃO	32

4. INJEÇÃO DE JUNTAS DE CONTRAÇÃO DE BARRAGENS ABÓBADA

4.1. CONSIDERAÇÕES INTRODUTÓRIAS	33
4.2. MATERIAIS DE INJEÇÃO	34
4.3. FASE DE INJEÇÃO DE JUNTAS DE BARRAGENS	34
4.4. PROCESSO DE INJEÇÃO DOS COMPARTIMENTOS	35
4.4.1. “ENSAIOS COM ÁGUA” DOS COMPARTIMENTOS A INJETAR COM CALDA DE CIMENTO	36
4.4.2. INJEÇÃO PRIMÁRIA	36
4.4.3. INJEÇÃO SECUNDÁRIA	39
4.5. ASPETOS CONSTRUTIVOS DA INJEÇÃO DE JUNTAS DE CONTRAÇÃO	39

5. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO AO CÁLCULO DE BARRAGENS ABÓBADA

5.1. MODELOS DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE BETÃO	41
5.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	43
5.3. BASES DA FORMULAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	45
5.3.1. ELEMENTOS SÓLIDOS TRIDIMENSIONAIS	46
5.3.2. ELEMENTOS FINITOS DE JUNTA	52
5.3.3. COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR DO ELEMENTO DE JUNTA	57

6. MODELO DE INJEÇÃO DE JUNTAS DE CONTRAÇÃO DA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO

6.1. DESCRIÇÃO DA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO	59
6.2. DEFINIÇÃO GEOMÉTRICA DA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO	62
6.3. PROGRAMA ANSYS	64
6.3.1. MODELOS DE TESTE PRECEDENTES AO MODELO DA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO	64

6.4. DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS NO PROGRAMA ANSYS.....	65
6.4.1. ELEMENTOS SÓLIDOS TRIDIMENSIONAIS	66
6.4.2. ELEMENTOS DE CONTACTO	67
6.5. MODELO ESTRUTURAL DA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO	68
6.5.1. CARATERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO BETÃO E DO MACIÇO DE FUNDAÇÃO	68
6.5.2. MODELO DA BARRAGEM.....	70
6.5.3. DISCRETIZAÇÃO DA MALHA	73
6.6. INJEÇÃO DAS JUNTAS DE CONTRAÇÃO DA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO.....	75
6.7. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO	79
6.8. EFEITO DA PRESSÃO HIDROSTÁTICA.....	83
 7. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO MODELO DA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO	 85
7.1. CONSIDERAÇÕES INTRODUTÓRIAS.....	85
7.2. PESO PRÓPRIO.....	86
7.2.1. COM JUNTAS ABERTAS	86
7.2.2. COM JUNTAS FECHADAS.....	88
7.2.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	91
7.3. INJEÇÃO DAS JUNTAS DE CONTRAÇÃO	94
7.3.1. ESTRATÉGIA DE INJEÇÃO 1	94
7.3.2. ESTRATÉGIA DE INJEÇÃO 2	97
7.3.3. ESTRATÉGIA DE INJEÇÃO 3.....	100
7.3.4. ESTRATÉGIA DE INJEÇÃO 4.....	103
7.3.5. ESTRATÉGIA DE INJEÇÃO 5.....	106
7.3.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	109
7.4. PRESSÃO HIDROSTÁTICA	115
7.4.1. ALBUFEIRA EM NME (51 M)	116
7.4.2. ALBUFEIRA EM NPA (109 M)	118
7.4.3. ALBUFEIRA EM NMC (110 M).....	121
7.4.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	123
7.5. ANÁLISE DAS TENSÕES ANTES E DURANTE O ENCHIMENTO DA ALBUFEIRA.....	129
7.5.1. TENSÕES INICIAIS ANTES DO ENCHIMENTO DA ALBUFEIRA (COMBINAÇÃO 1)	129
7.5.2. COMBINAÇÃO AÇÕES PP+PI+PH DURANTE A FASE DO ENCHIMENTO DA ALBUFEIRA (COMBINAÇÃO 2)	137

7.5.3. COMBINAÇÃO DAS AÇÕES PP+PH DURANTE A FASE DO ENCHIMENTO DA ALBUFEIRA (COMBINAÇÃO 3)	144
7.5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS DAS 3 COMBINAÇÕES DE AÇÕES	150

8. CONCLUSÃO	153
8.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	153
8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	154

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Formas do vale	7
Fig. 2 - Método de transmissão dos impulsos às fundações da barragem	8
Fig. 3 – Barragem de gravidade aligeirada (com vazamentos internos) – Barragem do Torrão.....	8
Fig. 4 – Barragem de gravidade com contrafortes (com vazamentos externos) – Barragem da Pracana	9
Fig. 5 – Método de transmissão de forças às fundações da barragem	9
Fig. 6 – Barragem arco-gravidade – Barragem de Castelo do Bode.....	10
Fig. 7 – Transferência dos impulsos à fundação da barragem	10
Fig. 8 – Transferência dos impulsos à fundação na Barragem do Alto Lindoso - vista de montante...	11
Fig. 9 – Barragem de abóbada de dupla curvatura (vale em V) – Barragem do Cabril.....	11
Fig. 10 – Barragem de abóbadas múltiplas – Barragem da Aguieia	12
Fig. 11 - Barragem de terra com perfil homogêneo: 1) sem sistema de drenagem; 2) com dreno de chaminé; 3) com dreno horizontal; 4) com dreno de pé de talude.....	12
Fig. 12 - Barragem de terra com perfil zonado: 1) com núcleo interno 2) com talude de montante impermeável e talude de jusante permeável.	13
Fig. 13 - Barragem de aterro de enrocamento com: 1) cortina a montante 2) núcleo impermeável	13
Fig. 14 – Exemplos de barragens abóbada construídas em BC e BCC, respetivamente.	15
Fig. 15 – Processo de construção de uma barragem em BCC.	16
Fig. 16 – Esquema elucidativo das ações térmicas numa barragem de betão em fase de exploração.	21
Fig. 17 - Definição geométrica das barragens abóbada	25
Fig. 18 - Esquema elucidativo da evolução térmica durante a construção de uma barragem abóbada com arrefecimento artificial	31
Fig. 19 - Esquema elucidativo da evolução térmica durante a construção de uma barragem abóbada sem arrefecimento artificial	31
Fig. 20 - Deslocamentos positivos dos blocos para montante da barragem após injeção das juntas da barragem.	35
Fig. 21 - Corte vertical de uma junta tipo com lâminas e dispositivos para injeção primária da Barragem do Alto Lindoso.....	37
Fig. 22 - Corte horizontal de uma junta com lâminas e dispositivos para injeção primária da Barragem do Alto Lindoso.....	38
Fig. 23 - Pormenores das lâminas, tubos e ranhuras, a utilizar na junta para injeção primária da Barragem do Alto Lindoso.....	38
Fig. 24 - Utilização integrada de modelos físicos e de modelos numéricos em estudos da Barragem do Alto Lindoso.....	41

Fig. 25 - Utilização do Método dos Elementos Discretos no estudo do comportamento da barragem de Cambambe	42
Fig. 26 - Exemplo de Barragem discretizada em elementos finitos tridimensionais.....	45
Fig. 27 - Substituição de variáveis do sistema de coordenadas do referencial geral para o referencial local de um elemento sólido tridimensional hexaédrico de 8 pontos nodais	47
Fig. 28 - Elementos finitos de junta: a) Elemento triangular de 6 pontos nodais; b) Elemento quadrangular de 8 pontos nodais; c) Elemento quadrangular de 16 pontos nodais.	53
Fig. 29 - Combinação de elementos finitos sólidos de 8 nós e de elementos de superfície de 4 nós.	53
Fig. 30 - Elementos finitos de interface de linha 2D: a) linear de 4 nós b) quadrática de 6 nós	54
Fig. 31 - Diagrama as tensões e deslocamentos normais relativos ao elemento de junta.....	58
Fig. 32 - Diagrama as tensões e deslocamentos tangenciais relativos ao elemento de junta	58
Fig. 33 - Barragem do Alto Lindoso. Vista aérea	59
Fig. 34 - Aproveitamento hidroelétrico do Alto Lindoso	60
Fig. 35 - Planta da Barragem do Alto Lindoso	61
Fig. 36 - Definição em perfil da Barragem do Alto Lindoso	61
Fig. 37 - Perfil da Barragem do Alto Lindoso - Corte vertical pela consola central	62
Fig. 38 - Corte horizontal à profundidade Z e corte vertical da Barragem do Alto Lindoso	63
Fig. 39 - Modelo de teste obtido pelo ANSYS - composto por um conjunto de: 1) 10 blocos em fila; 2) 6 blocos em forma de arco.....	65
Fig. 40 - Discretização em elementos finitos tridimensionais hexaédricos da interação barragem-fundação e do corte vertical da consola central da Barragem do Alto Lindoso	65
Fig. 41 - Elemento Finito de 8 nós – SOLID185 (ANSYS 14.5).....	66
Fig. 42 - Elemento Finito de 20 nós – SOLID186 (ANSYS 14.5).....	67
Fig. 43 - Geometria dos elementos TARGE170 e CONTA174 (ANSYS 14.5)	67
Fig. 44 – Superfície do elemento e superfície “alvo” (ANSYS 14.5).....	68
Fig. 45 – Definição das propriedades do betão da barragem e do maciço de fundação	69
Fig. 46 – Seleção por cores, dos materiais utilizados no modelo (ANSYS)	69
Fig. 47 - Modelo geométrico do corpo da Barragem do Alto Lindoso em AutoCAD	70
Fig. 48 - Modelo geométrico de volumes do conjunto Barragem-Fundação do Alto Lindoso em ANSYS	72
Fig. 49 - Modelo geométrico de volumes do corpo da Barragem do Alto Lindoso e a respectiva consola central em ANSYS	72
Fig. 50 - Malha: 1) de elementos hexaédricos; 2) de elementos tetraédricos; 3) refinada de elementos tetraédricos; definida no ANSYS.....	74
Fig. 51 – Arcos da barragem para diferentes cotas dos compartimentos.	74
Fig. 52 - Vista de montante da Barragem do Alto Lindoso	75

Fig. 53 - Juntas de contração da Barragem do Alto Lindoso definidas por elementos de contato, TARGE170 e CONTA174	75
Fig. 54 - Aplicação da pressão de injeção nas três malhas definidas para o modelo da Barragem do Alto Lindoso.....	79
Fig. 55 – Deformada da estrutura para a estratégia de injeção 1 com uma malha de elementos hexaédricos.	80
Fig. 56 – Deslocamentos obtidos na malha de elementos hexaédricos na estratégia de injeção 1 para os coeficientes de atrito iguais a 0.0, 0.8, e 2.0, respetivamente.	83
Fig. 57 - Aplicação da pressão hidrostática nos modelos da Barragem do Alto Lindoso.....	84
Fig. 58 – Deslocamento radial devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas abertas (m)	86
Fig. 59 – Tensões horizontais (σ_x) na direção dos blocos devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas abertas (MPa).....	87
Fig. 60 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas abertas (MPa).....	87
Fig. 61 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas abertas (MPa).....	88
Fig. 62 – Deslocamento radial devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas fechadas (m)	88
Fig. 63 – Tensões horizontais (σ_x) na direção dos blocos devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas fechadas (MPa)	89
Fig. 64 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas fechadas (MPa)	89
Fig. 65 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas fechadas (MPa)	90
Fig. 66 – Deslocamento radial devido à estratégia de injeção 1 (m)	94
Fig. 67 – Vetores de deslocamentos devido à estratégia de injeção 1 (m)	94
Fig. 68 – Tensões horizontais σ_x devido à estratégia de injeção 1 (MPa)	95
Fig. 69 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à estratégia de injeção 1 (MPa).....	95
Fig. 70 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à estratégia de injeção 1 (MPa).....	96
Fig. 71 – Direção das tensões principais no paramento de jusante e montante respetivamente, devido à estratégia de injeção 1	96
Fig. 72 – Deslocamento radial devido à estratégia de injeção 2 (m)	97
Fig. 73 – Vetores de deslocamentos devido à estratégia de injeção 2 (m)	97
Fig. 74 – Tensões horizontais σ_x devido à estratégia de injeção 2 (MPa)	98
Fig. 75 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à estratégia de injeção 2 (MPa).....	98
Fig. 76 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à estratégia de injeção 2 (MPa).....	99

Fig. 77 – Direção das tensões principais no paramento de jusante e montante respetivamente, devido à estratégia de injeção 2	99
Fig. 78 – Deslocamento radial devido à estratégia de injeção 3 (m)	100
Fig. 79 – Vetores de deslocamentos devido à estratégia de injeção 3 (m)	100
Fig. 80 – Tensões horizontais σ_x devido à estratégia de injeção 3 (MPa)	101
Fig. 81 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à estratégia de injeção 3 (MPa)	101
Fig. 82 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à estratégia de injeção 3 (MPa)	102
Fig. 83 – Direção das tensões principais no paramento de jusante e montante respetivamente, devido à estratégia de injeção 3	102
Fig. 84 – Deslocamento radial devido à estratégia de injeção 4 (m)	103
Fig. 85 – Vetores de deslocamentos devido à estratégia de injeção 4 (m)	103
Fig. 86 – Tensões horizontais σ_x devido à estratégia de injeção 4 (MPa)	104
Fig. 87 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à estratégia de injeção 4 (MPa)	104
Fig. 88 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à estratégia de injeção 4 (MPa)	105
Fig. 89 – Direção das tensões principais no paramento de jusante e montante respetivamente, devido à estratégia de injeção 4	105
Fig. 90 – Deslocamento radial devido à estratégia de injeção 5 (m)	106
Fig. 91 – Vetores de deslocamentos devido à estratégia de injeção 5 (m)	106
Fig. 92 – Tensões horizontais σ_x devido à estratégia de injeção 5 (MPa)	107
Fig. 93 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à estratégia de injeção 5 (MPa)	107
Fig. 94 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à estratégia de injeção 5 (MPa)	108
Fig. 95 – Direção das tensões principais no paramento de jusante e montante respetivamente, devido à estratégia de injeção 5	108
Fig. 96 – Deslocamento radial devido à ação da pressão hidrostática com albufera NmE (m)	116
Fig. 97 – Vetores de deslocamentos devido à ação da pressão hidrostática com albufera NmE (m)	116
Fig. 98 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à ação da pressão hidrostática com albufera NmE (MPa)	117
Fig. 99 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à ação da pressão hidrostática com albufera NmE (MPa)	117
Fig. 100 – Direção das tensões principais no paramento de montante e jusante respetivamente, devido à ação da pressão hidrostática com albufera NmE	118
Fig. 101 – Deslocamento radial devido à ação da pressão hidrostática com albufera NPA (m)	118
Fig. 102 – Vetores de deslocamentos devido à ação da pressão hidrostática com albufera NPA (m)	119

Fig. 103 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à ação da pressão hidrostática com albufera NPA (MPa).....	119
Fig. 104 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à ação da pressão hidrostática com albufera NPA (MPa).....	120
Fig. 105 – Direção das tensões principais no paramento de montante e jusante respetivamente, devido à ação da pressão hidrostática com albufera NPA	120
Fig. 106 – Deslocamento radial devido à ação da pressão hidrostática com albufera NMC (m)	121
Fig. 107 – Vetores de deslocamentos devido à ação da pressão hidrostática com albufera NMC (m)	121
Fig. 108 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à ação da pressão hidrostática com albufera NMC (MPa).....	122
Fig. 109 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à ação da pressão hidrostática com albufera NMC (MPa).....	122
Fig. 110 – Direção das tensões principais no paramento de montante e jusante respetivamente, devido à ação da pressão hidrostática com albufera NMC.....	123
Fig. 111 – Deslocamentos radiais para diferentes níveis de enchimento da albufera.....	124
Fig. 112 – Evolução dos deslocamentos radiais observados na base de coordenómetro do fio de prumo PP3 situado à cota 336,0m e correspondentes valores calculados	125
Fig. 113 – Deslocamento radial devido à combinação de ações PP+PI (m).....	129
Fig. 114 – Vetores de deslocamentos devido à combinação de ações PP+PI (m)	129
Fig. 115 – Tensões horizontais σ_x devido à combinação de ações PP+PI (MPa).....	130
Fig. 116 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à combinação de ações PP+PI (MPa).....	130
Fig. 117 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à combinação de ações PP+PI (MPa)	131
Fig. 118 – Direção das tensões principais devido à combinação de ações PP+PI	131
Fig. 119 – Deslocamento radial devido à combinação das ações PP+PI+PH – albufera vazia (m) .	137
Fig. 120 – Deslocamento radial devido à combinação das ações PP+PI+PH – albufera em NmE (m)	137
Fig. 121 – Deslocamento radial devido à combinação das ações PP+PI+PH – albufera ao nível 83m (m)	138
Fig. 122 – Deslocamento radial devido à combinação das ações PP+PI+PH - albufera em NPA (m)	138
Fig. 123 – Deslocamento radial devido à combinação das ações PP+PI+PH - albufera em NMC (m)	139
Fig. 124 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à combinação das ações PP+PI+PH (MPa)....	141
Fig. 125 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à combinação das ações PP+PI+PH (MPa)	141
Fig. 126 – Direção das tensões principais devido à combinação das ações PP+PI+PH	142
Fig. 127 – Tensões horizontais σ_x , devido à combinação das ações PP+PI+PH (MPa).....	143

Fig. 128 – Deslocamento radial devido à combinação das ações PP+PH - albufeira em NMC (m) ..	144
Fig. 129 – Vetores de deslocamentos devido à combinação das ações PP+PH - albufeira em NMC (m)	145
Fig. 130 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à combinação das ações PP+PH (MPa)	146
Fig. 131 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à combinação das ações PP+PH (MPa)	147
Fig. 132 – Direção das tensões principais devido à combinação das ações PP+PH	147
Fig. 133 – Tensões horizontais devido à combinação das ações PP+PH	148

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. – Estratégia de Injeção 1	76
Tabela 2. – Estratégia de Injeção 2	76
Tabela 3. – Estratégia de Injeção 3	77
Tabela 4. – Estratégia de Injeção 4	77
Tabela 5. – Estratégia de Injeção 5	77
Tabela 6 - Pressões aplicadas nas faces dos elementos que têm contactos (valores em MPa)	78
Tabela 7 – Exemplo de aplicação das pressões – iteração 1 da estratégia de injeção 5 (valores em MPa)	78
Tabela 8 – Abertura do 1º compartimento injetado.....	81
Tabela 9 – Abertura do 7º compartimento injetado.....	82
Tabela 10 – Deslocamentos radiais máximos dependentes do coeficiente de atrito adotado para a estratégia de injeção 1.	82
Tabela 11 – Tensões principais ao longo da junta central a jusante e a montante, devido à ação do peso próprio (MPa).....	93
Tabela 12 – Deslocamentos radiais da junta central para as cinco estratégias de injeção.	110
Tabela 13 – Movimento das faces dos blocos 11 e 12 para as cinco estratégias de injeção.	111
Tabela 14 – Abertura da junta central para as cinco estratégias de injeção.	112
Tabela 15 – Tensões horizontais (σ_x) ao longo da junta central a jusante e montante da barragem, para as cinco estratégias de injeção (MPa)	113
Tabela 16 – Tensões principais máximas (σ_1) ao longo da junta central a jusante e montante da barragem, para as cinco estratégias de injeção (MPa)	114
Tabela 17 - Deslocamentos radiais da consola de fecho para diferentes níveis de enchimento da albufeira (mm)	124
Tabela 18 – Tensões principais máximas (σ_1) ao longo da junta central, no paramento de jusante e montante, devido à ação da pressão hidrostática, para para diferentes níveis de enchimento da albufeira (MPa)	127
Tabela 19 – Tensões principais mínimas σ_3 , no paramento de jusante e montante, ao longo da junta central devido à ação da pressão hidrostática, para diferentes níveis de enchimento da albufeira (MPa)	128
Tabela 20 – Deslocamento radial da junta central no paramento de montante devido a PP, a PI e à combinação de PP+PI (mm).	133
Tabela 21 – Movimento das faces dos blocos 11 e 12 devido a PP, a PI e à combinação de PP+PI (mm).	134
Tabela 22 – Tensões principais máximas ao longo da junta central devido à combinação das ações PP+PI (MPa)	135

Tabela 23 – Tensões principais mínimas ao longo da junta central devido à combinação das ações PP+PI (MPa)	135
Tabela 24 - Deslocamento radial da junta central no paramento de montante devido às ações isoladas PP e PI, e às combinações de ações 1 e 2.	140
Tabela 25 - Deslocamento radial da junta central no paramento de montante devido às ações isoladas PP (com juntas fechadas) e PH, e à combinação 3.....	146

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Deslocamentos radiais dos blocos centrais no paramento de montante devido ao peso próprio.	91
Gráfico 2 - Movimento das faces dos blocos 11 e 12 e Abertura da junta central no paramento de montante devido ao peso próprio.	92
Gráfico 3 – Tensões principais máximas e mínimas ao longo da junta central no paramento de montante e jusante devido ao peso próprio.	93
Gráfico 4 – Deslocamento radial da junta central no paramento de montante para as cinco estratégias de injeção.	109
Gráfico 5 - Movimento das faces dos blocos 11 e 12 para as cinco estratégias de injeção	111
Gráfico 6 - Abertura da junta central no paramento de montante para as cinco estratégias de injeção.	112
Gráfico 7 - Tensões horizontais (σ_x) ao longo da junta central a jusante e montante da barragem, para as cinco estratégias de injeção (MPa)	113
Gráfico 8 - Tensões principais máximas a jusante e mínimas a montante ao longo da junta central da barragem, para as cinco estratégias de injeção (MPa)	114
Gráfico 9 - Curvas de influência, no topo da junta central, para diferentes níveis de enchimento da albufeira & deslocamento radial no coroamento.....	126
Gráfico 10 - Tensões principais máximas (σ_1) ao longo da junta central devido à ação da pressão hidrostática, para diferentes níveis de enchimento da albufeira (MPa)	127
Gráfico 11 - Tensões principais mínimas (σ_3) ao longo da junta central devido à ação da pressão hidrostática, para diferentes níveis de enchimento da albufeira (MPa)	128
Gráfico 12 – Deslocamento radial da junta central no paramento de montante devido a PP, a PI e à combinação de PP+PI (mm).	132
Gráfico 13 - Movimento das faces dos blocos 11 e 12 e Abertura da junta central no paramento de montante devido a PP, a PI e à combinação de PP+PI (mm).	133
Gráfico 14 - Tensões principais máximas (σ_1) ao longo da junta central devido à combinação das ações PP+PI (MPa)	134
Gráfico 15 - Tensões principais mínimas ao longo da junta central devido à combinação das ações PP+PI (MPa)	135
Gráfico 16 - Tensões horizontais (σ_x) ao longo da junta central devido à combinação das ações PP+PI (MPa)	136
Gráfico 17 – Deslocamento radial da junta central no paramento de montante devido às ações isoladas PP e PI, e às combinações de ações 1 e 2.	140
Gráfico 18 – Tensões principais máximas e mínimas, respetivamente, na junta central, devido à combinação das ações PP+PI+PH	142
Gráfico 19 – Tensões horizontais na junta central devido à combinação das ações PP+PI+PH	143

Gráfico 20 – Deslocamento radial da junta central no paramento de montante devido às ações isoladas PP (com juntas fechadas) e PH, e à combinação 3	145
Gráfico 21 – Tensões principais máximas e mínimas, na junta central, devido à combinação das ações PP+PH	148
Gráfico 22 – Tensões horizontais, na junta central, devido à combinação das ações PP+PH	149
Gráfico 23 – Deslocamento radial da junta central, no paramento de montante, devido às combinações de ações.....	150
Gráfico 24 – Tensões principais máximas e mínimas, na junta central, a jusante e montante devido às 3 combinações de ações (MPa)	151
Gráfico 25 – Deslocamento no coroamento da barragem, no paramento de montante.....	151

ÍNDICE DE ESQUEMAS

Esquema 1 - Principais tipos estruturais de barragens.....	6
Esquema 2 - Aspectos construtivos de barragens em betão convencional (BC).....	14
Esquema 3 - Aspectos construtivos de barragens em betão compactado com cilindros (BCC)	14
Esquema 4 - Estudos de base de apoio	17
Esquema 5 - Principais fases de desenvolvimento do projeto	18
Esquema 6 - Principais ações atuantes nas barragens de betão.....	19
Esquema 7 - Esquema de refrigeração artificial dos betões de barragens de betão	28
Esquema 8 - Incógnitas e equações fundamentais no equilíbrio tridimensional da Mecânica dos Sólidos.....	44
Esquema 9 – Fluxograma do processo de cálculo do modelo da Barragem abóbada do Alto Lindoso.	71

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ε – Extensão

γ - Distorção

σ – Tensão normal [Pa]

ρ – Massa volumica (kg/m³)

ν - Coeficiente de Poisson

a – Deslocamento nodal

B – Matriz de deformação

D – Matriz de elasticidade

E – Modulo de Elasticidade [Pa]

F – Forças nodais equivalentes [N]

g – Aceleração da gravidade [m/s²]

J – Matriz jacobiana

L – Operador diferencial

m – massa (kg)

N – Função interpoladora ou função de forma

T – temperatura [°C]

u – Campo de deslocamentos

ACI – American Concrete Institute

APDL – ANSYS Parametric Design Language

INAG – Instituto da água, I.P

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

BC – Betão Convencional

BCC – Betão Compactado com Cilindros

Fig. – Figura

INVM – Variação de temperatura em época fria

MEF – Método dos Elementos Finitos

NmE – Nível mínimo de Exploração

NmEN – Nível mínimo de Exploração Extraordinário

NmEN – Nível mínimo de Exploração Normal

NMC – Nível de Máxima Cheia

NPA – Nível de Pleno Armazenamento

PVC – Policloreto de Polivinila

SBP – Sísmo Base de Projeto

SME – Sísmo Máximo Expectável

SMP – Sísmo Máximo de Projeto

VERN – Variação de temperatura em época quente

Com o objetivo de facilitar a leitura por parte do leitor, efectuou-se também a descrição de cada notação / símbolo pelo menos na sua primeira utilização ao longo do texto.

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Uma barragem é uma obra de engenharia construída transversalmente a um curso de água em forma de barreira artificial com o objetivo de reter o máximo volume de água possível, formando uma albufeira, para posteriormente ser utilizada no abastecimento público, industrial e agrícola, bem como para produção de energia elétrica e regularização de caudal.

A construção de uma barragem e a respetiva formação de uma albufeira pode ter o benefício adicional de reduzir o risco das consequências das cheias naturais. Todavia, deve ser tido também em atenção que uma barragem tem associados riscos potenciais elevados, nomeadamente, em caso da sua eventual rutura. O conjunto barragem-fundação deve resistir às ações que a solicitam, ou seja, ações originadas pelo peso próprio, variações de temperatura, efeito de sismos, sendo naturalmente a principal ação a pressão da água.

Este trabalho de dissertação foca-se apenas nas barragens de betão, com especial enfoque nas barragens abóbada, que se podem dividir em abóbadas cilíndricas, caso a barragem possua apenas curvatura em planta, ou abóbada de dupla curvatura, caso a barragem seja curva quer na vertical quer na horizontal.

A forma estrutural das barragens abóbada é preponderante para a sua resistência às ações provocadas pela pressão da água e a sua curvatura permite que os esforços sejam transferidos para os apoios nas margens, sendo por isso necessário uma qualidade adequada do maciço de fundação.

A utilização de juntas de contração em barragens, para além de facilitar a sua construção, visa minimizar o aparecimento de fissuração e consequentes deformações na barragem que advêm dos efeitos de contração do betão.

As barragens abóbada são construídas por blocos, separados por juntas de contração verticais com um espaçamento recomendado entre si da ordem dos 15 metros. Este tipo de juntas pode ser dotado de caixotões (“shear boxes”) e são geralmente definidas por planos verticais radiais, à superfície de referência. Para garantir o monolitismo desejado para o seu funcionamento estrutural, as juntas são injetadas com calda de cimento.

As ações que influenciam a contração do betão das barragens têm de ser vistas como um ponto importante da análise estrutural tanto no período de colocação do betão como no período posterior. Tendo como objetivo garantir que a injeção das juntas de contração é feita com o betão à temperatura pretendida, as camadas de betonagem são munidas de serpentinas onde circulará água do rio ou água refrigerada. Além disso, recorre-se à utilização mais ajustada da composição do betão em termos da

quantidade de cimento e cinzas, à definição de um adequado plano de betonagem e ao estudo da necessidade, ou não, da utilização de arrefecimento artificial do betão da barragem.

Estes temas aqui expostos serão revistos em detalhe no decorrer do trabalho.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

De entre as disposições construtivas necessárias para o bom desempenho estrutural da barragem abóbada, são abordadas neste trabalho de forma especial a refrigeração dos betões e o processo de injeção das juntas de contração, a realizar antes do primeiro enchimento da albufeira.

Neste âmbito, é efetuada uma análise do comportamento, das técnicas e materiais utilizados na Barragem do Alto Lindoso, com ênfase no processo sequencial de injeção, das pressões utilizadas e a avaliação dos seus efeitos estruturais.

É ambicionado também nesta dissertação dar continuidade a um programa desenvolvido pela EDP, com o objetivo de implementar, de forma automática, todo o processo laborioso desde a definição da geometria e dos parâmetros intrínsecos à barragem à metodologia de cálculo.

Por outro lado, é proposto que se execute a simulação do modelo estrutural da Barragem do Alto Lindoso e a metodologia de cálculo respetiva, simulando o processo de injeção de juntas de contração e da pressão hidrostática, através do programa ANSYS. O processo de injeção de juntas de contração da barragem em causa será analisado com base em cinco estratégias diferentes de injeção, pretendendo analisar-se as pressões da injeção das juntas, os deslocamentos radiais dos blocos centrais da barragem, os valores das tensões principais máxima e mínima, bem como as tensões horizontais no arco e verticais instaladas no corpo da barragem.

1.3. DESCRIÇÃO SUMÁRIA DOS CAPÍTULOS

A dissertação é composta por sete capítulos.

No primeiro capítulo – “Introdução” - faz-se a integração no tema da dissertação, abordando inicialmente considerações genéricas sobre as barragens de betão, em especial, as barragens abóbadas e sintetizando a função das juntas de contração nelas existentes. Neste mesmo capítulo, são propostos os objetivos primordiais para este trabalho.

No segundo capítulo – “Barragens de betão” - é efetuada a classificação genérica de uma barragem, de acordo com diferentes critérios, tendo em conta a importância, a capacidade de armazenamento e finalidade da estrutura, o tipo de materiais utilizados na barragem, a forma da estrutura e o tipo de estrutura. São descritos os dois principais tipos estruturais de barragens (barragens de betão e de aterro). São caracterizadas as duas possíveis tecnologias construtivas de barragens abóbada, através de Betão Convencional (BC) e Betão Compactado com Cilindros (BCC). Além disso, evidenciam-se as principais ações que atuam no conjunto barragem-fundação, ou seja, ações da pressão da água, das variações de temperatura, do peso próprio, da expansão dos materiais, das ações sísmicas, entre outros fenómenos. Este capítulo termina com a definição geométrica das barragens abóbada.

No terceiro capítulo – “Refrigeração de barragens de betão” - pretende-se salientar a importância que este processo tem no controlo e redução da temperatura ocorrida ao longo do processo construtivo de uma barragem de betão com o objetivo de proporcionar condições para a execução das injeções das juntas de contração de tais barragens. Neste capítulo, são referenciados os métodos de arrefecimento artificial do betão e as causas das variações térmicas ocorridas, é exposto um esquema síntese do

sistema de refrigeração artificial de uma barragem de betão e é descrito o procedimento e monitorização realizado na pós-refrigeração do betão dos blocos da barragem.

No quarto capítulo - “Injeção de juntas de contração de barragens abóbada” - são mencionados aspectos globais referentes às juntas de contração e aos respectivos caixotões (“shear boxes”), assim como os seus materiais constituintes. Seguidamente, é indicado o processo de injeção das juntas de barragens, salientando o procedimento efetuado na injeção primária e na injeção secundária destes. Posteriormente, são apresentados aspetos construtivos executados na injeção das referidas juntas.

No quinto capítulo - “Método dos Elementos Finitos aplicado ao cálculo de barragens abóbada” - são expostos de uma forma abreviada as técnicas e modelos que simulem e façam uma previsão aproximada do comportamento que estas estruturas podem apresentar perante certas solicitações. De seguida, foca-se a análise nos métodos numéricos e em especial no Método dos Elementos Finitos, nos quais é estabelecida a sua formulação, e posteriormente, de forma ainda mais pormenorizada, é efetuado um estudo relativo aos elementos sólidos tridimensionais e aos elementos finitos de junta, que foram utilizados na modelação da barragem e nas análises efectuadas.

No sexto capítulo - “Modelo de injeção de juntas de contração da barragem do Alto Lindoso” - são descritas introdutoriamente as características primordiais da barragem do Alto Lindoso e a definição geométrica da barragem. Seguidamente é efectuada uma breve abordagem ao programa ANSYS e a realização de testes prévios em dois modelos simplificados para simular a injeção de juntas. Neste capítulo são descritos os elementos finitos a serem utilizados pelo programa ANSYS na modelação do corpo da barragem e do maciço rochoso adjacente, ou seja, elementos sólidos tridimensionais e os elementos de contacto. Com base neste programa, foi desenvolvido o modelo estrutural da barragem de forma automática, que permitiu simular cinco estratégias diferentes de injeção das juntas de contração, bem como simular a ação da pressão hidrostática na estrutura.

No sétimo capítulo – “Análise dos resultados obtidos no modelo da Barragem do Alto Lindoso” - são analisados os resultados relativos à ação do peso próprio, às diferentes estratégias de injeção das juntas de contração adotadas, à ação da pressão hidrostática na estrutura, bem como a diferentes combinações entre estas ações.

No oitavo e último capítulo, são apresentadas as conclusões fundamentais a reter do trabalho realizado e propostos possíveis desenvolvimentos futuros.

2

BARRAGENS DE BETÃO

2.1. CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS

Para se classificar uma barragem, há que ter em conta diferentes critérios de selecção. Estes critérios podem ser baseados na capacidade de armazenamento e a finalidade para que foi concebida a estrutura, na tipologia do material utilizado na definição da sua estrutura, ou na forma e tipo de estrutura.

O Regulamento de Segurança de Barragens classifica as barragens de acordo com o critério seguido pela Comissão Internacional de Grandes Barragens, segundo o qual, as barragens podem ser classificadas em função da sua importância em grandes barragens e pequenas barragens. Assim, de acordo com este Regulamento, define-se como sendo grandes barragens as barragens com uma altura igual ou superior a 15 metros, medida desde a cota mais baixa da superfície geral das fundações até à cota do coroamento, ou a barragens de altura igual ou superior a 10 metros, cuja albufeira tenha uma capacidade superior a 1 milhão de metros cúbicos. As barragens de altura inferior a 15 metros que não estejam incluídas no grupo anterior mas com capacidade de albufeira superior a 100 mil metros cúbicos são designadas de pequenas barragens. (Regulamento de Segurança de Barragens, 2007)

Tendo como base a capacidade de armazenamento e a finalidade para que foi concebida a estrutura, as barragens podem ser classificadas em quatro grupos:

- Barragens com o objetivo de criar albufeira, com vista ao armazenamento de água afluente para ser utilizada em períodos de seca;
- Barragens de retenção, que tem como fins principais a retenção de material sólido afluente e/ou prevenir e reter a água das cheias provisoriamente;
- Barragens de derivação, que tem o propósito de captar água para canais ou condutas, sem originar albufeira de regularização;
- Barragens destinadas a múltiplas finalidades;

O critério mais preponderante e generalizado na classificação de barragens refere-se à tipologia do material utilizado na definição da sua estrutura, podendo ser classificadas em dois grandes grupos:

- Barragens de betão;
- Barragens de aterro;

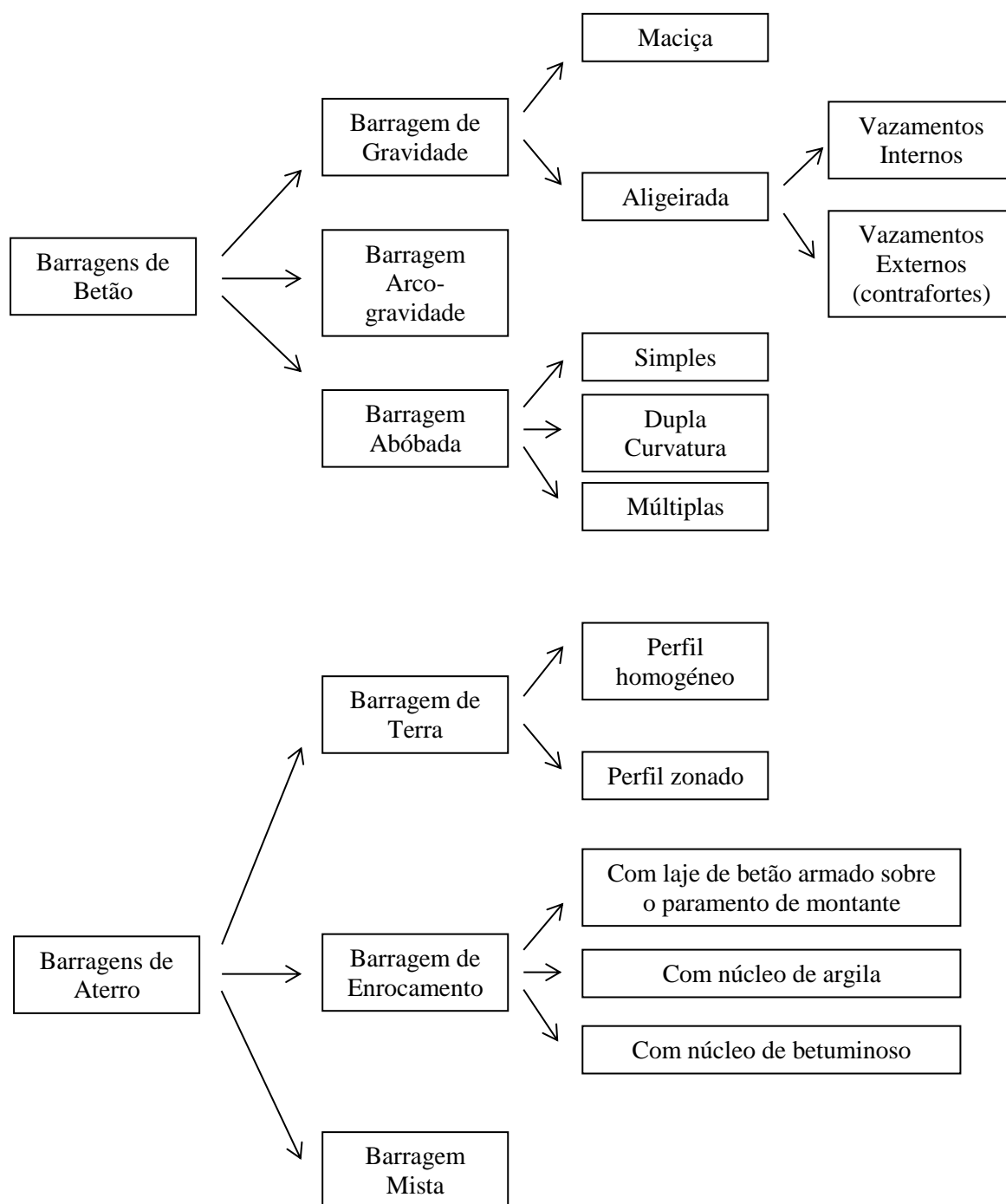
Este critério será analisado com mais detalhe no ponto seguinte.

Por fim, e depois de conhecida a finalidade da barragem a construir, o tipo de barragem a escolher tem como condicionamentos principais a topografia e materiais disponíveis no local, as condições

geológicas e geotécnicas, a inserção dos evacuadores de cheia de acordo com o caudal de dimensionamento, que serão preponderantes em termos económicos.

2.2. PRINCIPAIS TIPOS ESTRUTURAIS DE BARRAGENS

Apresenta-se no esquema 1 uma organização possível de classificação dos tipos de barragens, que serão caracterizados nos pontos seguintes.



Esquema 1 - Principais tipos estruturais de barragens

2.2.1. BARRAGENS DE BETÃO

Em relação ao seu tipo estrutural, as barragens de betão classificam-se genericamente em barragens de gravidade, arco-gravidade e abóbada. Podem ainda dividir-se em outras subclasses, dependendo das suas formas estruturais. Assim, as barragens de gravidade podem ser aligeiradas ou com contrafortes, enquanto que as barragens abóbada podem ser em abóbada simples, em dupla curvatura ou em abóbada múltipla.

A forma do vale onde se prevê a construção da barragem influi na opção do tipo de barragem a escolher. Em termos genéricos, a forma de um vale é expressa pela relação corda/altura (L/d) à cota do coroamento, em que, se o valor obtido for inferior a 3 é denominado de garganta. Se for compreendido entre 3 e 6 é estreito, e caso seja superior a 6 é largo. Assim, caso estejam dispostas todas as condições necessárias para a realização, perante valores inferiores ou iguais a 5, o tipo de barragem mais usual é a barragem abóbada, e caso contrário, será mais aconselhável a realização de uma barragem de gravidade (Jesus, R., 2011).

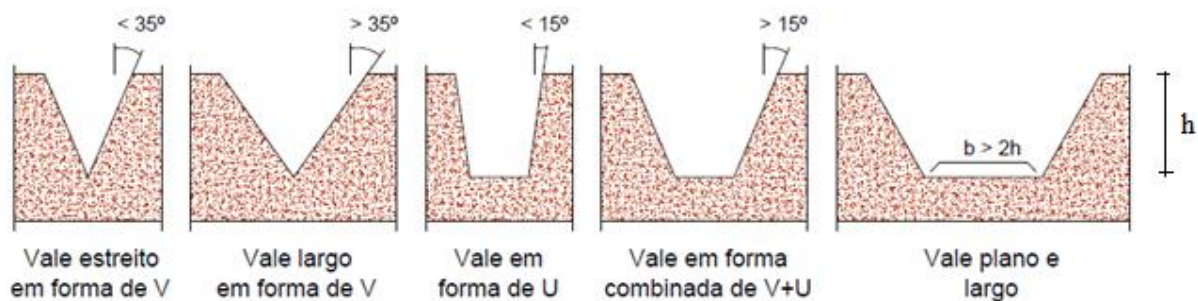


Fig. 1 - Formas do vale (adaptado de Jesus,R.,2011)

Os elevados volumes de betão associados aos ritmos de construção deste tipo de barragens originam a dificuldade de dissipação do calor devido às reações de hidratação do cimento e, em consequência, elevações significativas de temperatura na base de construção.

Para ter em atenção este fenómeno e os efeitos adversos do posterior arrefecimento da estrutura, esta é dotada de juntas de contração, é estudada a composição do betão com vista à diminuição do conteúdo de cimento e, caso necessário, procede-se à pré-refrigeração e à pós-refrigeração do betão, com base em estudos térmicos específicos.

2.2.1.1. Barragens de gravidade

As barragens de gravidade apresentam, em geral, uma espessura na base superior a 0,7 da altura da barragem e uma seção transversal com uma forma aproximadamente triangular. Esta geometria é a que apresenta a melhor solução para a distribuição dos esforços transmitidos pelo peso próprio e pela pressão da água à fundação dos blocos. A sua estabilidade é garantida simplesmente pelo peso próprio. O seu paramento de montante pode ser vertical ou apresentar uma inclinação de $0,1H$ para $1V$ e o paramento de jusante apresentar uma inclinação superior a $0,65H$ para $1V$. São construídas com base num eixo retilíneo ou num eixo curvo com grande raio de curvatura com o objetivo de melhor se inserir na topografia existente e de conferir uma maior resistência global do deslizamento.

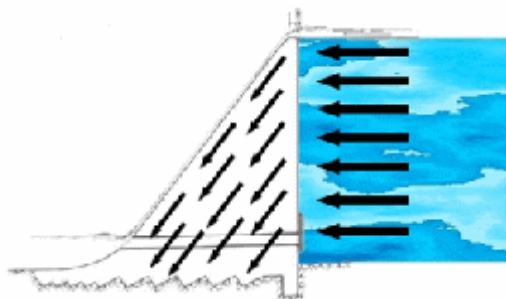


Fig. 2 - Método de transmissão dos impulsos às fundações da barragem (Fonte: http://dc426.4shared.com/doc/1HvI_C4a/preview.html)

Nas barragens de gravidade, devido às suas dimensões, torna-se necessário o uso de juntas de dilatação para controlar as fissurações e os seus efeitos adversos, mantendo assim a sua segurança, além de que é importante durante a betonagem o controlo da temperatura do betão.

As soluções aligeiradas são obtidas pela existência de vazamentos no interior no corpo da barragem que permitem reduzir o volume de betão e diminuir as subpressões, quando os vazamentos se inserem no contacto com a fundação da barragem.

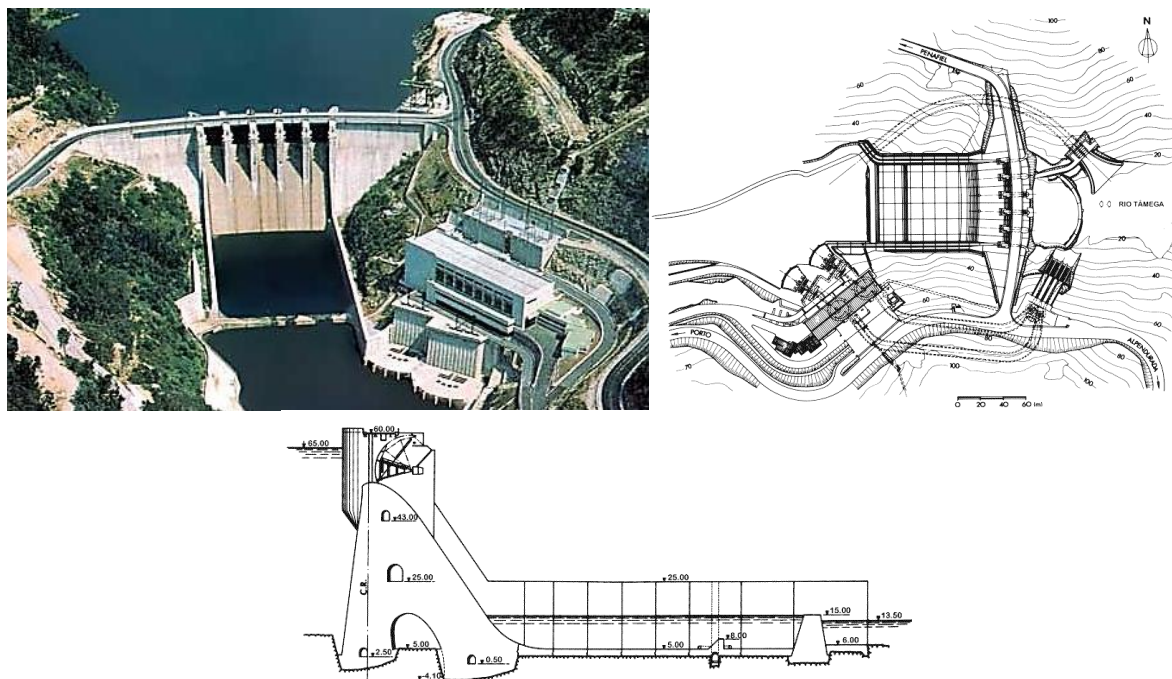


Fig. 3 – Barragem de gravidade aligeirada (com vazamentos internos) – Barragem do Torrão (Fonte: http://cnpqb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/Torrao.htm)

As barragens de gravidade com contrafortes são construídas em vales largos com baixo declive e um solo de fundação de boa qualidade. Com esta solução a pressão da água no paramento de montante inclinado aumenta a estabilidade da estrutura. Exemplo deste tipo de barragens é a Barragem da Pracana que se localiza no distrito de Castelo Branco.

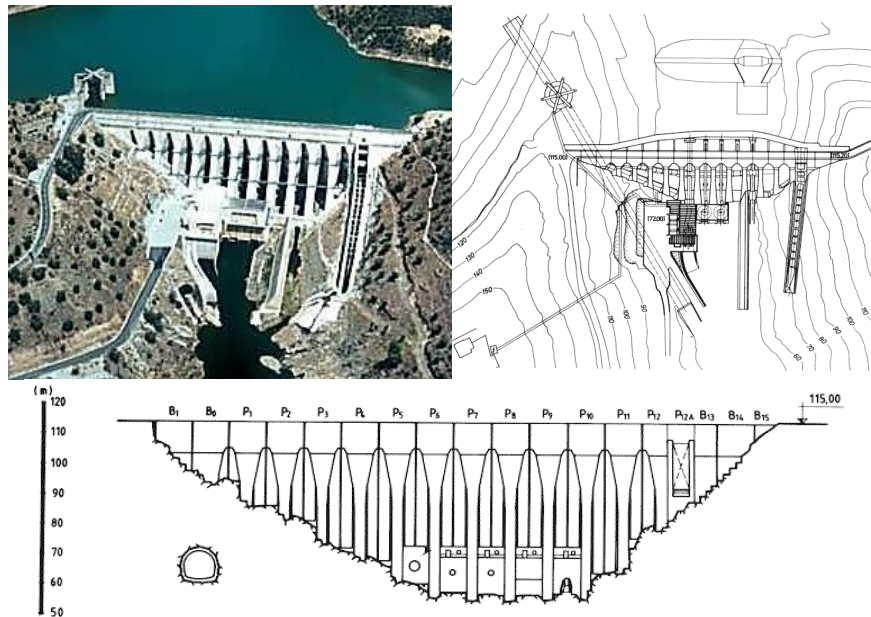


Fig. 4 – Barragem de gravidade com contrafortes (com vazamentos externos) – Barragem da Pracana (Fonte: http://cnpqb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/Pracana.htm)

2.2.1.2. Barragens arco-gravidade

As barragens arco-gravidade são barragens que tem a possibilidade de serem construídas em vales largos, na medida em que usufruem de uma solução estrutural que contenha vantagens quer das barragens de gravidade quer das barragens abóbada, ao possuírem curvatura em planta e seção transversal triangular. Neste tipo de barragens, as ações atuantes são encaminhadas não só às fundações mas igualmente aos encontros, tornando-se notório que o arco introduz na estrutura um efeito estabilizador bastante benéfico, pelo que é possível reduzir o peso próprio e assim diminuir a espessura da base da barragem.

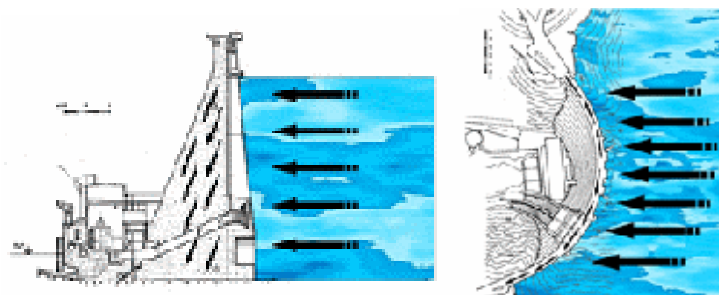


Fig. 5 – Método de transmissão de forças às fundações da barragem (Fonte: http://dc426.4shared.com/doc/1HvI_C4a/preview.html)

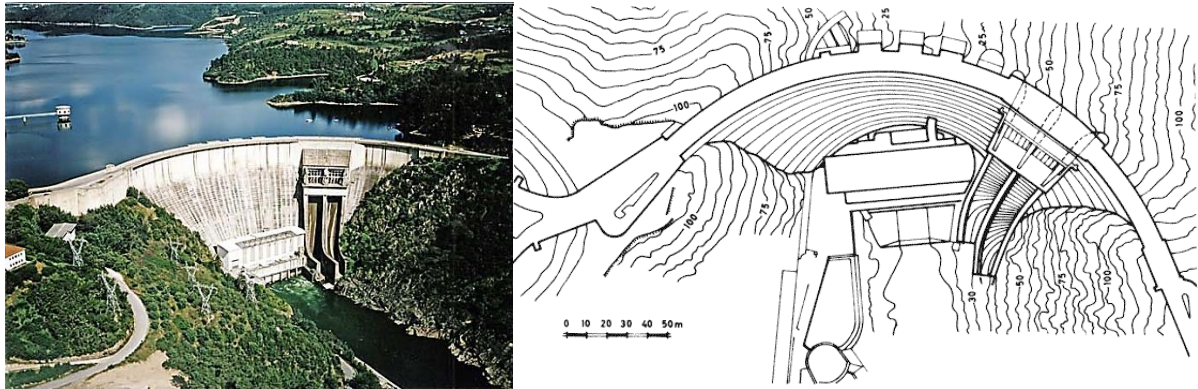


Fig. 6 – Barragem arco-gravidade – Barragem de Castelo do Bode (Fonte: http://cnpqb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/CastelodoBode.htm)

2.2.1.3. Barragens abóbada

As barragens abóbadas são estruturas contínuas muito esbeltas com geometria variável, podendo ser de simples ou dupla curvatura, ou seja, apresenta uma seção transversal e longitudinal em arco. Desde que a resistência dos arcos à compressão o viabilize, é praticável a redução do volume de betão em comparação com as barragens de gravidade. Este tipo de estrutura, com funcionamento monolítico e devido ao efeito de arco, descarrega os impulsos ao longo do seu contorno.

Dependendo do local escolhido para a construção da barragem, poderá ser necessário recorrer-se a encontros artificiais nas zonas altas das margens, como por exemplo em locais onde a largura do vale a cotas superiores for elevada ou em casos em que se verifica uma menor qualidade do maciço de fundação.

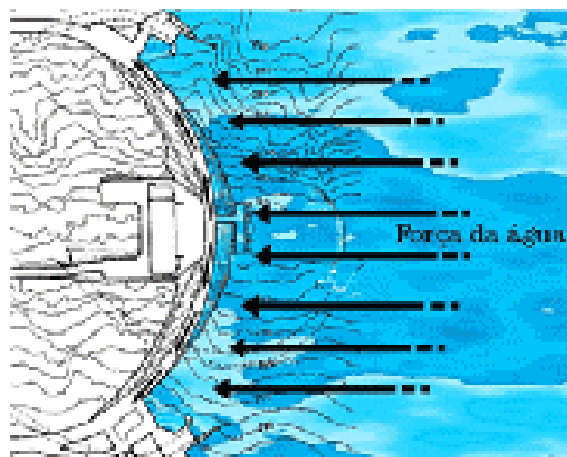


Fig. 7 – Transferência dos impulsos à fundação da barragem (Fonte: http://dc426.4shared.com/doc/1HvI_C4a/preview.html)

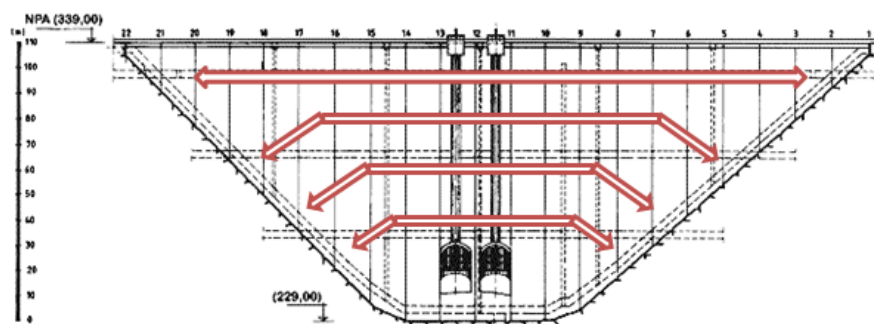


Fig. 8 – Transferência dos impulsos à fundação na Barragem do Alto Lindoso - vista de montante

Este tipo de barragens é exequível em vales estreitos, com topografia irregular desde que o maciço de fundação possua a resistência necessária de modo a fazer face às solicitações geradas com a construção da barragem.

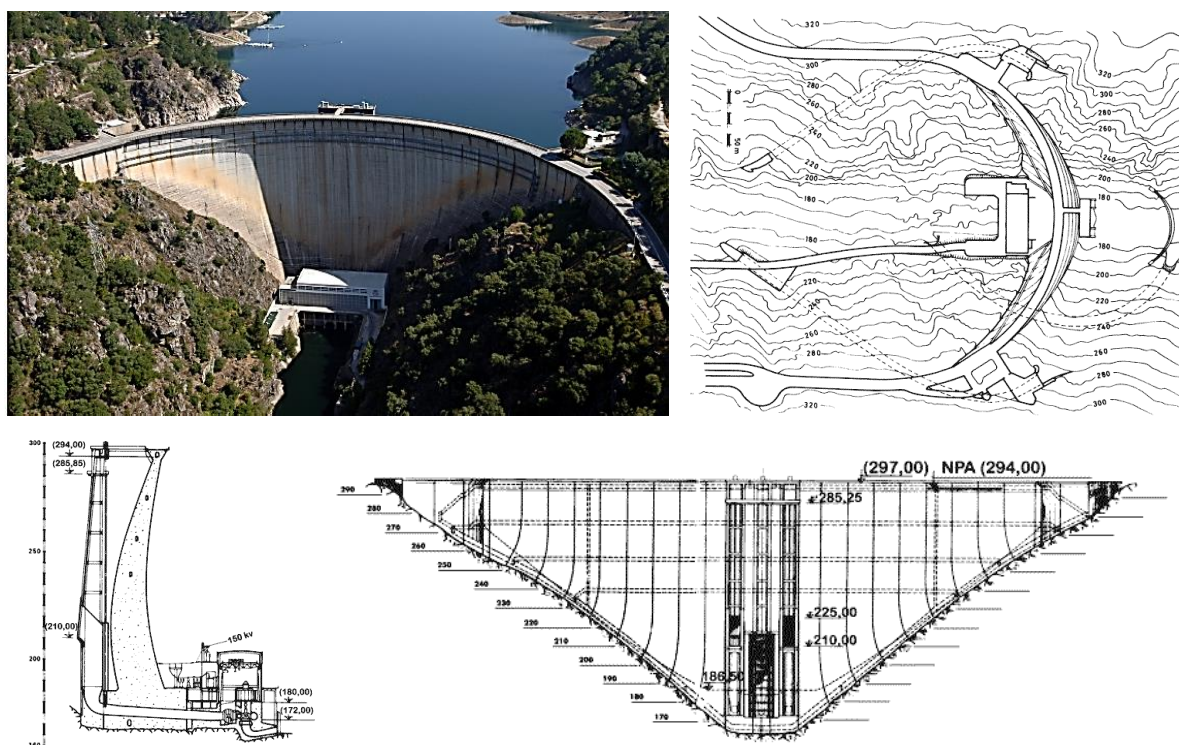


Fig. 9 – Barragem de abóbada de dupla curvatura (vale em V) – Barragem do Cabril (Fonte: http://cnpqb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/Cabril.htm)

Por vezes a construção de barragens de abóbada múltipla recai sobre o facto de estas serem construídas com menor volume de betão, embora a sua execução seja difícil e apresente má adaptação a assentamentos não uniformes. Este tipo de barragem tem múltiplas abóbadas, em que a estabilidade global é garantida pelos contrafortes, e a estabilidade local de cada vão pelas abóbadas sucessivas que compõe a barragem.

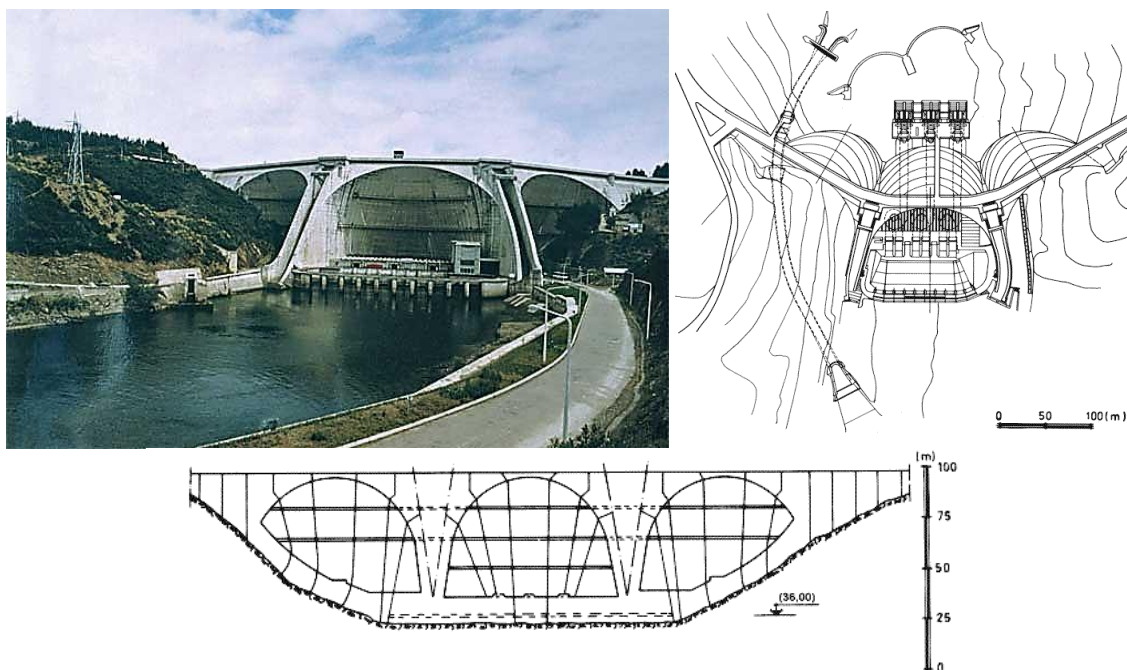


Fig. 10 – Barragem de abóbadas múltiplas – Barragem da Aguieira (Fonte: http://cnpqb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/Aguieira.htm)

2.2.2. BARRAGENS DE ÁTERRO

As barragens de aterro são estruturas construídas por materiais soltos provenientes da escavação. Dependendo do tipo de material solto utilizado, estas podem designar-se de barragem de terra, barragem de enrocamento ou caso utilize ambos os materiais, por mistas.

São denominadas de barragens de terra, caso a constituição do seu corpo seja pelo menos de 50% de solo compactado, podendo apresentar perfil homogéneo ou perfil zonado.

As barragens de terra homogénea são constituídas maioritariamente por um único tipo de material, possuindo um coeficiente de permeabilidade reduzido permitindo assim níveis de percolação aceitáveis. Como tal, é utilizado um material permeável na construção dos sistemas de drenagem, através da inclusão de drenos (dreno de chaminé, dreno horizontal, dreno de pé de talude) para efectuar o controlo da percolação, como é possível constatar nas três figuras seguintes. Em geral, este tipo de barragens apresenta uma inclinação diferente dos taludes de montante e jusante.

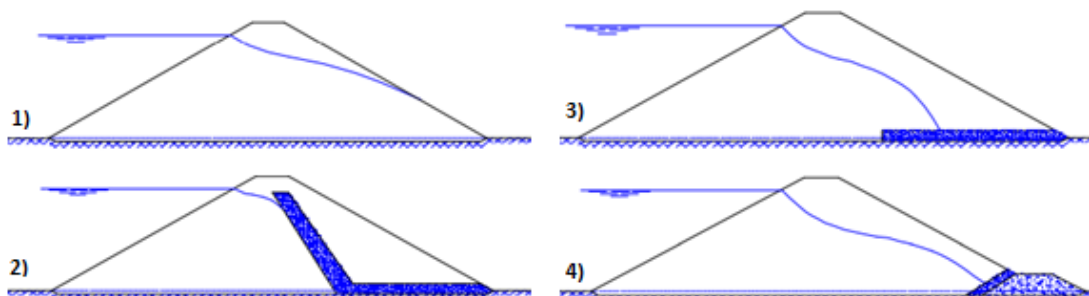


Fig. 11 - Barragem de terra com perfil homogéneo: 1) sem sistema de drenagem; 2) com dreno de chaminé; 3) com dreno horizontal; 4) com dreno de pé de talude. (Lança, R., 1997).

As barragens de terra zonadas são constituídas por diferentes tipos de solos, com diferentes características. Uma das possíveis e mais usadas soluções para este tipo de barragem é a utilização no seu núcleo central do solo que apresente menor coeficiente de permeabilidade e nos taludes será utilizado o restante solo, como se pode ver na figura 2.12 1). Outra solução usual é a utilização de material impermeável no talude de montante com funções vedantes e material permeável no talude de jusante com funções estruturais, como se pode ver na figura 2.12 2).

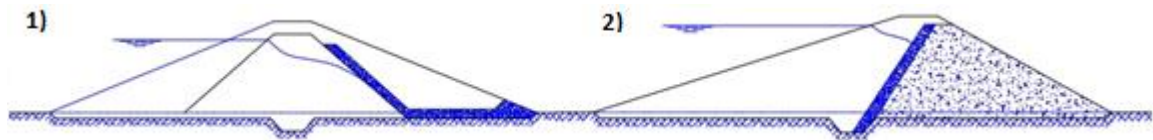


Fig. 12 - Barragem de terra com perfil zonado: 1) com núcleo interno 2) com talude de montante impermeável e talude de jusante permeável (Lança, R., 1997).

São classificadas de barragens de enrocamento, quando utilizam na sua constituição, maciços de materiais granulares de características rochosas que garantem a estabilidade da estrutura. A sua impermeabilização pode ser garantida por órgãos de estanqueidade a montante (laje de betão armado sobre o paramento de montante) ou órgãos de estanqueidade internos (núcleo de argila ou de betuminoso da barragem).

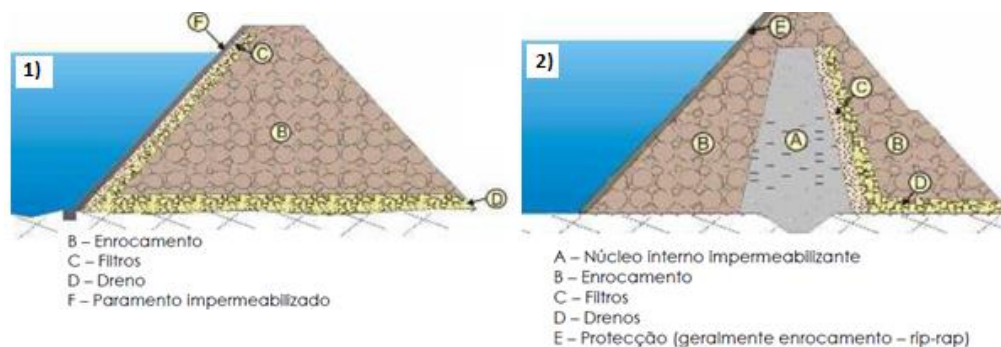


Fig. 13 - Barragem de aterro de enrocamento com: 1) cortina a montante 2) núcleo impermeável

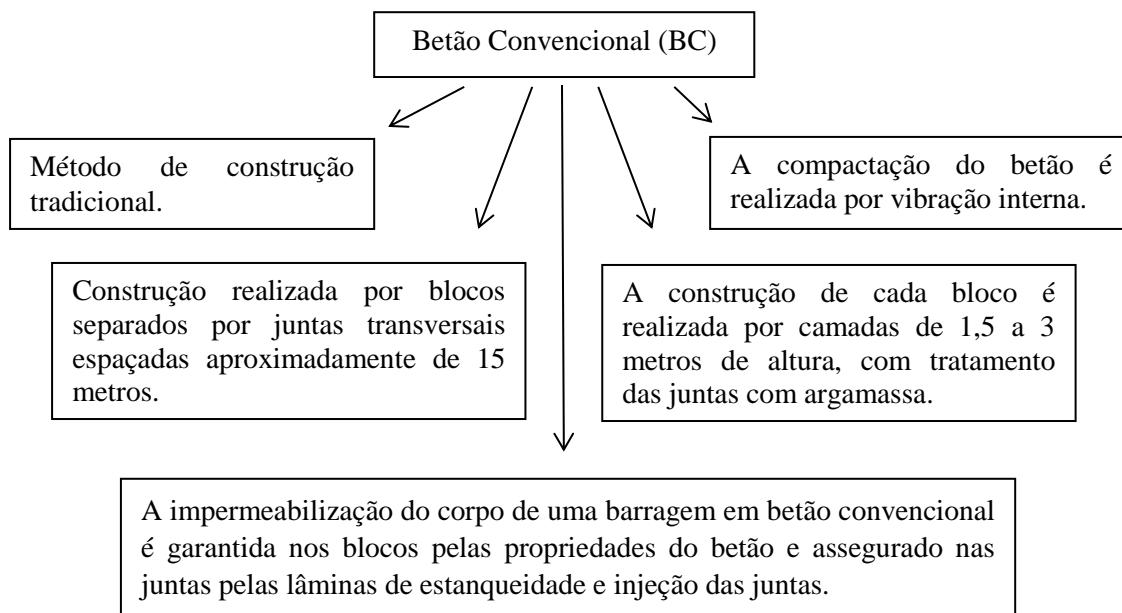
Por fim, são designadas de barragens mistas, as que são constituídas por dois maciços, um de terra e outro de enrocamento.

Assim, as barragens de aterro caracterizam-se pela sua construção ser feita por colocação de camadas sucessivas de materiais soltos com formas e espessuras diferentes que são seguidamente compactadas. A inclinação dos seus paramentos é pouco acentuada, motivo pelo que exige elevados volumes de material. Por outro lado, não necessitam de condições geológicas e geotécnicas de fundação tão exigentes em comparação com barragens de betão.

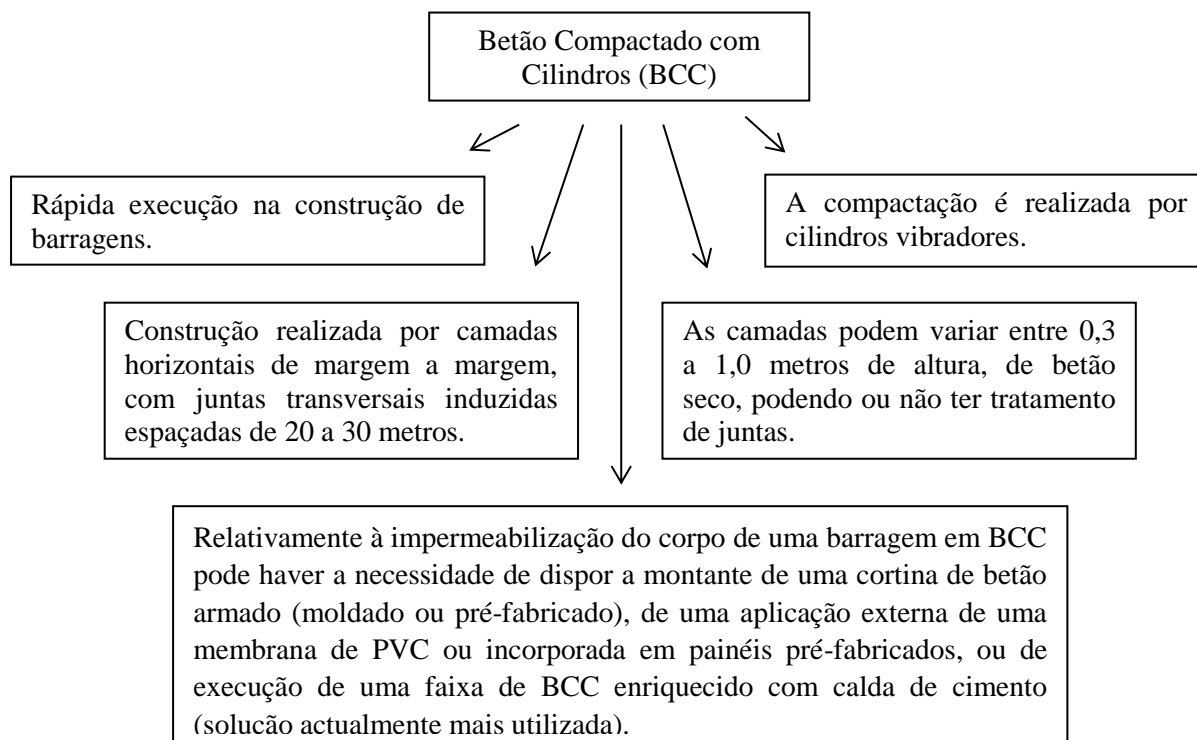
2.3. TECNOLOGIAS DE CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS DE BETÃO

2.3.1. ASPETOS CONSTRUTIVOS ENTRE BETÕES CONVENCIONAIS & BETÕES COMPACTADOS COM CILINDROS

Actualmente, as barragens de betão podem ser construídas por duas tecnologias construtivas diferentes, sendo que uma utiliza o designado Betão Convencional (BC) e a mais recente, o Betão Compactado com Cilindros (BCC).



Esquema 2 - Aspectos construtivos de barragens em betão convencional (BC)



Esquema 3 - Aspectos construtivos de barragens em betão compactado com cilindros (BCC)



Fig. 14 – Exemplos de barragens abóbada construídas em BC e BCC, respetivamente.

De acordo com a Norma de Construção de Barragens, “o BCC é um betão seco, com abaixamento nulo, de modo a permitir que o equipamento de transporte e colocação, semelhante ao usado na construção de barragens de aterro, possa circular sobre o betão fresco” (Portaria n.º 246/98, 1998).

Esta nova tecnologia desenvolveu-se a partir do início dos anos 60 através de uma procura incessante por parte da engenharia em busca de um método construtivo de barragens mais rápido e económico, tendo sido aplicada inicialmente apenas em barragens de gravidade e mais tarde em barragens abóbada. A construção de barragens em BCC permitiu reduzir a intensidade de trabalho, encurtar a duração do projeto e diminuir significativamente os custos do mesmo. (Qihua, C., 2003).

Segundo a US Army Corps of Engineers, esta tecnologia é cada vez mais utilizada em comparação com barragens construídas em betão convencional, visto que permite utilizar um betão com menor dosagem de cimento, reduzir a utilização de cofragens e permitir a realização da sua construção num tempo mais reduzido, advindo deste conjunto de factores, benefícios económicos (U.S.A.C.E, 2000).

A tecnologia construtiva de barragens abóbada em BCC é semelhante à realizada em barragens gravidade em BCC. A principal diferença entre estes dois tipos de barragens BCC é a necessidade de um maior controlo da temperatura e a concepção das juntas de contração. (Bofang, Z., 2003)

As barragens abóbada em BCC são construídas, em geral, por camadas de betão sobrepostas, idealmente de forma contínua, que permitem combinar a rapidez de execução dos betões compactados com cilindros e as vantagens das barragens abóbadas, tornando-se assim uma alternativa mais competitiva para projetos de barragens. Devido ao ritmo elevado de colocação e ao calor de hidratação do cimento do BCC, a temperatura aumenta podendo originar a fissuração do betão. (Gaixin, C., Guojin, J., Guoxing, H., 2003).

São apresentadas como desvantagens para este tipo de betão, situações que impossibilitem a construção da barragem a um ritmo normal, como, por exemplo, avarias de equipamentos associados aos trabalhos de compactação e transporte, um planeamento das operações construtivas mal executado e devido a condições atmosféricas adversas (INAG, 2002). Além destas situações existem outras desvantagens relacionadas com a construção de barragens em BCC; assim, por exemplo, no caso do maciço de fundação não apresentar boa qualidade, existe o risco de ocorrência de grandes assentamentos diferenciais. Devido à maior probabilidade de ocorrência de fissuração, as barragens devem estar providas com um maior número de juntas transversais, o que pode aumentar o risco de percolação e consequentemente a segurança e durabilidade da estrutura. (Batista, H., 2011)

Seguidamente é exposto um esquema elucidativo de um processo possível para construção de uma barragem em betão compactado com cilindros.

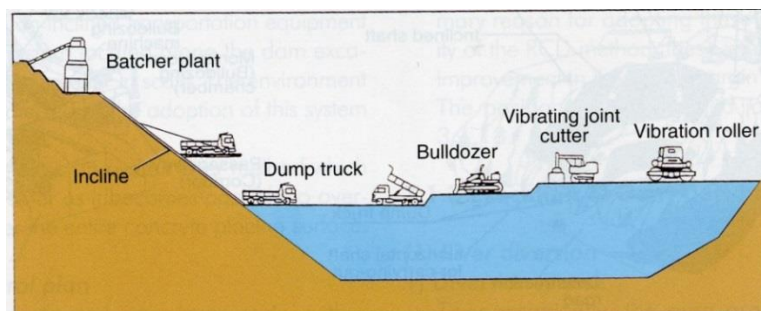


Fig. 15 – Processo de construção de uma barragem em BCC.

2.3.2. COMPOSIÇÃO E CONSISTÊNCIA DOS BETÕES

O Betão Compactado com Cilindros é um betão seco que é consolidado através de cilindros vibradores (vibração externa). A sua consistência tem de permitir a circulação dos cilindros na superfície do betão e na sua composição verifica-se uma reduzida dosagem de cimento, comparativamente à usada no Betão Convencional. Este tipo de betão é constituído pelo mesmo tipo de componentes que o betão convencional, sendo que a coesão, a resistência perante as tensões instaladas, a impermeabilidade, a durabilidade e a deformabilidade (Ribeiro, 1998) são obtidas pela estrutura de produtos hidratados, e neste caso o betão compactado com cilindros é de menor qualidade.

Com o objetivo de diminuir o calor de hidratação, desenvolvido no cimento, são utilizadas cinzas em detrimento de certas quantidades de cimento e, preferencialmente, cimento do tipo II.

Segundo Sagrado, J. e Marques, T., “um BCC bem doseado é aquele que apresenta uma quantidade de finos (ligantes e agregados) e uma dosagem de água adequada para que, quando adicionados a várias classes de agregados, gere uma porosidade mínima que torne a mistura mais consistente. Além da uma boa consistência, pretende-se, na formulação da mistura, gerar uma mistura impermeável que impeça a passagem de água pelo corpo da obra depois da construção” (Sagrado, J., 2008) e (Marques, T., 2008).

Quanto aos agregados, eles devem apresentar qualidades e parâmetros idênticos aos do betão convencional. Para incorporarem uma mistura de BCC, a sua selecção é influenciada pela disponibilidade de materiais no local da obra e pelas características relativas à resistência, durabilidade e permeabilidade da barragem. Esta selecção deve conter diferentes classes de agregados grossos, areias e finos.

A utilização de adjuvantes no betão compactado com cilindros é importante pois permite diminuir a quantidade de água, melhorar a trabalhabilidade do betão e a durabilidade das misturas de BCC, aumentar o número de vazios na mistura e o tempo de presa da mistura (U.S. Army Corps of Engineers, 2000). Como tal, os BCC utilizam uma maior quantidade de adjuvantes comparativamente com o BC.

2.3.3. JUNTAS DE CONTRAÇÃO EM BETÕES CONVENCIONAIS & BETÕES COMPACTADOS COM CILINDROS

Citando da Norma de Construção de Barragens, “nas barragens de BC as juntas de contração permitem reduzir os efeitos de retração dos betões durante a fase de libertação do calor de hidratação, limitar as dimensões dos blocos de betonagem e conferir à estrutura capacidade para suportar deslocamentos sem deteriorações, nomeadamente as que resultam da mudança brusca do perfil de escavação. (...) Podem prever-se nas barragens de BCC, juntas de contração do tipo convencional. Caso não tenham sido previstas juntas de contração do tipo convencional, podem ainda materializar-se superfícies de

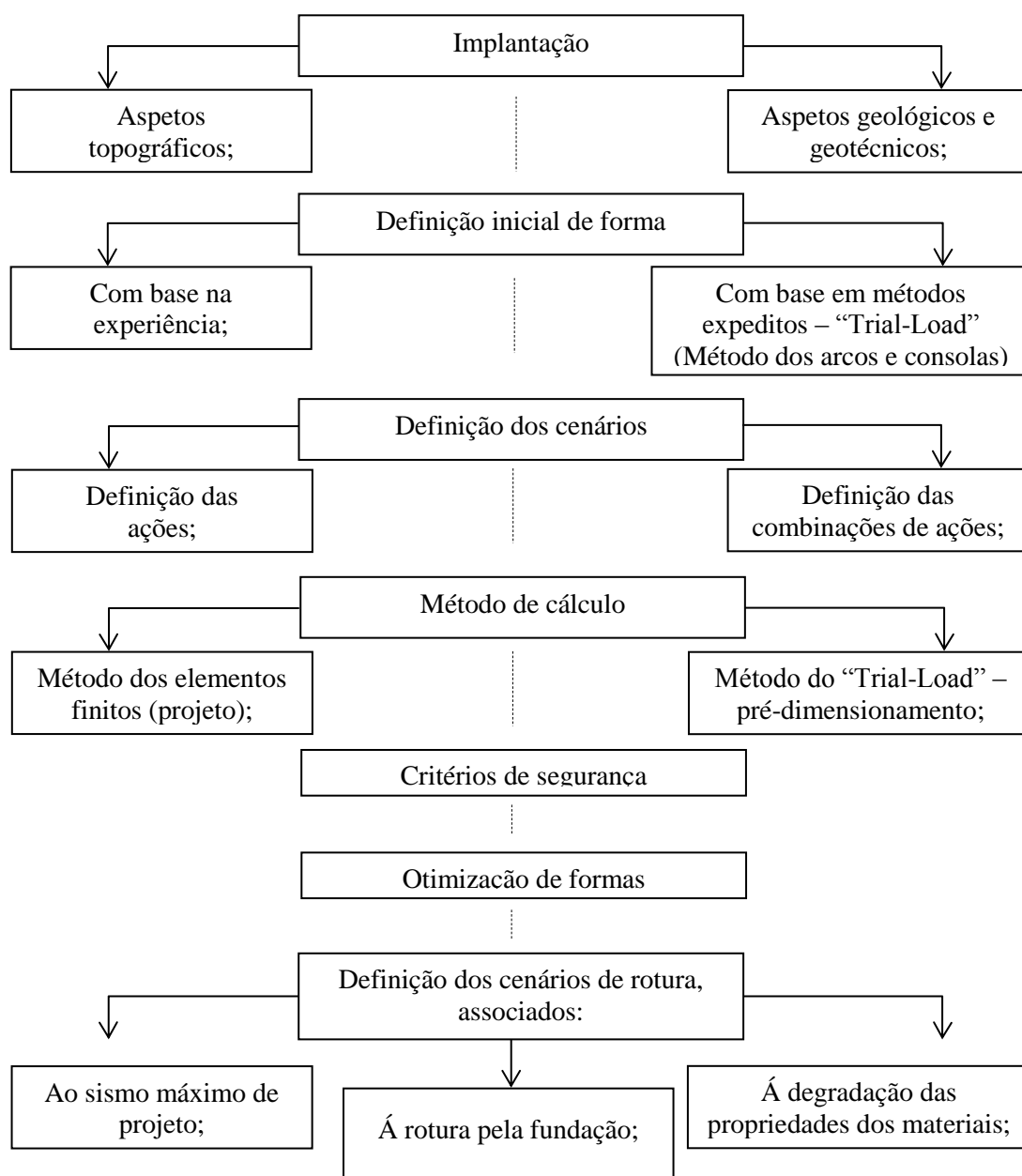
descontinuidade com desenvolvimento transversal por corte de cada camada após betonagem ou mediante dispositivos indutores de fendas. O tratamento por injeções das juntas de contração ou eventuais fendas espontâneas com desenvolvimento transversal será efetuado, quando necessário, por meio de furos executados a partir dos paramentos ou de galerias” (Portaria n.º 246/98, 1998).

2.4. ASPETOS DE PROJETO

Nos esquemas 4 e 5, são apresentados o conjunto de estudos de base e as principais fases de desenvolvimento do projeto de uma barragem de betão.

Cartografia	<ul style="list-style-type: none"> Levantamentos topográficos a escala adequada;
Estudos hidrológicos e hidráulicos	<ul style="list-style-type: none"> Avaliação das afluências e definição das cheias; Definição dos descarregadores e da sua eventual inserção na barragem;
Estudos de exploração da albufeira	<ul style="list-style-type: none"> Consideração das características da central e circuito hidráulico e os estudos de produtividade; Definição dos níveis de albufeira a considerar no cálculo da barragem;
Estudos geológicos e geotécnicos	<ul style="list-style-type: none"> Caraterização geológica da fundação; Identificação e caracterização das principais falhas e famílias de descontinuidades; Avaliação da resistência, deformabilidade e permeabilidade do maciço de fundação, com recurso a ensaios “in-situ” e laboratoriais; Zonamento das propriedades mecânicas e de permeabilidade do maciço; Fornecimento de elementos para o tratamento da fundação; Fornecimento de elementos para a melhor implantação da barragem; Fundamentais para a definição das profundidades de escavação necessárias para a barragem; Fornecimento de elementos para o tratamento da fundação;
Estudos sísmológico	<ul style="list-style-type: none"> Avaliação da vulnerabilidade sísmica do local; Definição das ações sísmicas de projeto;
Estudos dos materiais de construção para betão	<ul style="list-style-type: none"> Origem dos agregados grossos (exploração local ou em pedreiras existentes) e materiais finos (areia); Avaliação das quantidades necessárias e das disponibilidades; Caraterização dos materiais – ensaios e amassaduras experimentais;
Estudos ambientais	<ul style="list-style-type: none"> Definição dos principais aspetos ambientais a considerar.

Esquema 4 - Estudos de base de apoio (elementos EDP)



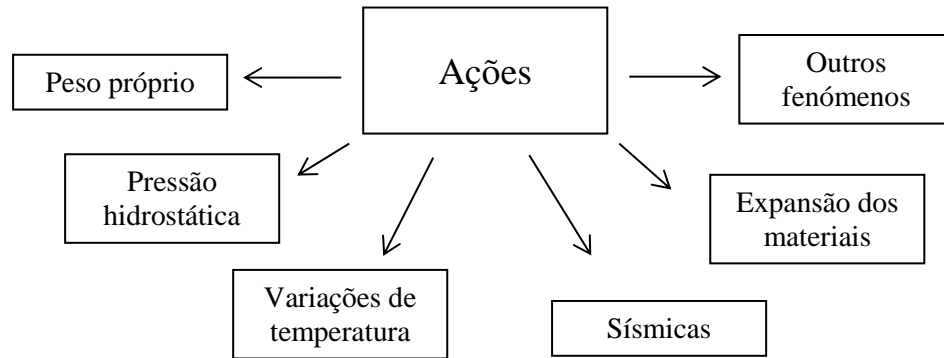
Esquema 5 - Principais fases de desenvolvimento do projeto (elementos EDP)

Na verificação da segurança deve ser tido em atenção a verificação dos níveis de tensão adequados no betão da barragem e no maciço de fundação, bem como das condições de segurança global que devem envolver:

- Blocos da barragem;
- Estabilidade ao longo do contato barragem-fundação;
- Estabilidade ao longo de potenciais superfícies de rotura pela fundação (envolvendo falhas e discontinuidades do maciço).

2.5. AÇÕES ATUANTES EM BARRAGENS DE BETÃO

Como referido anteriormente, o conjunto barragem-fundação deve resistir às ações que a solicitam, ou seja, ações originadas pelo peso próprio, pela pressão hidrostática, pelas ações resultantes das variações de temperatura, pela ação sísmica, pelas ações derivadas da expansão dos materiais e outros eventuais fenómenos.



Esquema 6 - Principais ações atuantes nas barragens de betão.

As ações poderão ser agrupadas de acordo com cinco critérios (Oliveira, S., 2000):

- O primeiro critério divide-se em ações externas ou ações internas, tendo como exemplos relevantes as ações da água, as ações térmicas e as ações sísmicas para o as primeiras ações ou o caso das reações químicas e das variações de volume termohigrométricas para as segundas ações.
- Ações de serviço, em que se salienta o peso próprio, a pressão hidrostática e as variações de temperatura ambientais ou ações excecionais em que se refere as ações dos sismos e os deslizamentos na fundação.
- As ações podem classificar-se ainda como estáticas, destacando-se o peso próprio e a pressão hidrostática ou dinâmicas como, por exemplo, os sismos.
- Ações correspondentes às forças aplicadas ou devidas a deformações impostas.
- Por fim, pode citar-se outro critério de acordo com as ações mais importantes aplicadas em três períodos da obra:
 - Durante o período construtivo, como peso próprio dos blocos, arrefecimento devido à libertação do calor de hidratação do cimento nas várias camadas de betonagem, pressão associada à injeção das juntas de contração;
 - Durante o período de primeiro enchimento, a pressão hidrostática e o arrefecimento do paramento de montante devido à subida da água são as ações mais importantes a serem consideradas;
 - Durante o período de exploração, evidencia-se a pressão hidrostática, as variações de temperatura, as expansões e os sismos;

Em suma, existem várias ações que solicitam uma barragem, e desta forma é importante equacionar combinações de ações que poderão ser mais preponderantes em diferentes períodos da obra. Assim, é necessário recorrer a modelos numéricos do conjunto barragem-fundação para verificar a segurança para os cenários mais críticos possíveis.

2.5.1. AÇÃO DO PESO PRÓPRIO

A ação do peso próprio (PP) pode ser considerada de acordo com dois métodos de análise, ou seja, ou simulando faseadamente o processo construtivo através do peso próprio relativo à betonagem das sucessivas camadas que compõe os blocos da barragem e considerando o sucessivo fecho ou abertura das juntas, ou simulando que o peso próprio seria aplicado na barragem já construída e monolitizada, de forma instantânea.

Na primeira abordagem, a análise do faseamento construtivo da barragem é importante e, como tal, no estudo do peso próprio dos betões frescos deve-se incluir o efeito de fluência destes. No modelo que simula o processo de construção dos blocos das barragens abóbada, há que ter em atenção o desenvolvimento de tensões verticais de tração. Estas tensões podem surgir inicialmente na base de jusante dos blocos, visto que estes estão inclinados para montante. No fim da construção da barragem, como a parte superior dos blocos estão geralmente inclinadas para jusante, tem de se controlar o valor das tensões verticais de compressão a montante que irão contrariar as tensões de tração induzidas nessa zona pelo efeito da pressão hidrostática.

Caso não seja relevante o efeito que o processo construtivo tem na distribuição das tensões do peso próprio, em comparação com o efeito da pressão hidrostática e da variação de temperatura ambiental, admite-se de forma simplificada que estas são parcialmente idênticas ao caso de serem aplicadas de uma única vez na barragem. Esta perspetiva adota-se quando se deseja, por exemplo, analisar o comportamento das barragens abóbada em fase de exploração. (Batista, A., 1998).

2.5.2. AÇÃO DA PRESSÃO HIDROSTÁTICA

Do ponto de vista estrutural, a ação da pressão hidrostática (PH) nas barragens de betão variam ao longo do tempo de vida da barragem de acordo com a cota de água da albufeira. A variação entre os níveis impostos de água entre montante e jusante provém essencialmente dos regimes de exploração da barragem e das condições pluviométricas. A ação da água tem uma importância fulcral na segurança estrutural, podendo manifestar-se das seguintes formas:

- Pressões hidrostáticas no paramento da barragem;
- Pressões internas nas fissuras das barragens de betão e nas superfícies de compartimentação da fundação, ou seja, podem originar o aparecimento de subpressões;
- Forças mássicas correspondentes à percolação da água na fundação da barragem;
- Modificação química dos materiais constituintes da fundação;
- Erosão dos materiais e de dispositivos presente na barragem;
- Deterioração dos maciços rochosos a jusante da barragem devido à percolação da água pelas descontinuidades;
- Ocorrência de pressões dinâmicas da água que se encontra em contato com a barragem, devido às vibrações impostas pelos sismos.

A ação da pressão hidrostática deve ser considerada para as seguintes quatro situações que enquadram a exploração da albufeira:

- Nível de Máxima Cheia (NMC);
- Nível de Pleno Armazenamento (NPA);
- Nível mínimo de Exploração Normal (NmEN);
- Nível mínimo de Exploração Extraordinário (NmEE).

2.5.3. AÇÕES DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

As variações de temperatura ocorrem ao longo das diversas fases de construção e da fase de exploração, pelo que pode dividir-se esta ação em dois tipos:

- as associadas à dissipação do calor de hidratação do cimento, que influenciam o comportamento da estrutura ao longo da sua execução;
- as associadas ao efeito da água da albufeira e às condições ambientais que estarão presentes sobre a estrutura quer na fase de construção, quer ao longo de todo o tempo de vida desta.

As variações de temperatura devido à dissipação do calor de hidratação do cimento são importantes ao nível do processo construtivo, uma vez que, o arrefecimento do betão pode provocar tensões de tração caso o arrefecimento se dê num espaço curto de tempo e desta forma causar fissuração do betão.

A análise da resposta térmica das barragens de betão pode ser efetuada com base num modelo numérico tridimensional onde se impõem adequadamente as ações térmicas (Fig. 16), sendo assim possível prever a propagação de calor e as variações de temperatura que ocorrerem no corpo da barragem (Teles, M., 1985).

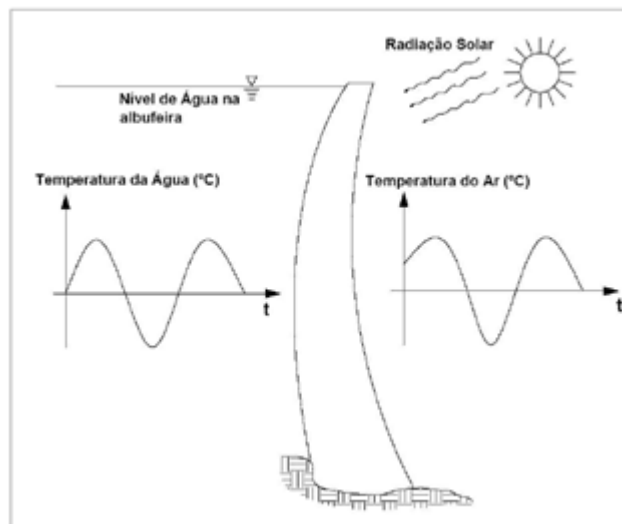


Fig. 16 – Esquema elucidativo das ações térmicas numa barragem de betão em fase de exploração.

2.5.4. AÇÃO SÍSMICA

As ações dinâmicas, como é exemplo a ação sísmica, natural ou induzida pela formação de albufeira, originam vibrações no local da barragem que dependem da forma da estrutura e da albufeira, assim como da deformabilidade dos seus materiais e da água. Estas ações podem ocorrer em diferentes períodos de vida da estrutura e, como tal, é necessário ter este tipo de ações sempre em consideração.

Estas ações devem ser devidamente caracterizadas através de fórmulas empíricas pelos valores máximos das acelerações, velocidades, deslocamentos e respectivas durações de atuação. Como tal, poderão ser utilizados espectros de potência definidos com base nos valores máximos mencionados anteriormente ou por espectros de resposta. Relativamente à análise sísmica, as tensões e a estabilidade de uma barragem devem ser avaliadas de acordo com a movimentação do terreno segundo

a direção montante-jusante (eixo do vale) e na direção vertical. Em certos casos, justifica-se também analisar as vibrações na direção transversal ao vale. Relativamente às durações dos sismos é habitual considerar trinta segundos para os sismos distantes e dez segundos para os sismos próximos. (Portaria n.º 846/93, 1993)

Recorrendo a um modelo de análise estrutural, é possível simular estas ações com o objectivo de se verificar e garantir a segurança em termos estruturais, para que os seus efeitos no comportamento das barragens não sejam prejudiciais.

Tendo como objetivo definir e caracterizar as ações sísmicas, de acordo com a grandeza, forma e duração das vibrações sísmicas, as Normas de Projetos de Barragens consideraram:

- Sísimo Máximo Expectável (SME), que se caracteriza por ser um sismo que apresenta um longo período de retorno, sendo estimado por via determinística ou probabilística.
- Sísimo Máximo de Projeto (SMP), que tem uma grandeza inferior ou igual ao SME em obras de risco potencial elevado.
- Sísimo Base de Projeto (SBP), que se caracteriza por ser um sismo com um período de retorno que dependerá do risco potencial da obra.

2.5.5. AÇÕES DAS EXPANSÕES

As expansões que ocorrem nas barragens de betão têm origem em reações químicas entre os seus constituintes. Entre outras, as reações álcalis-agregado e as reações que surgem por ação dos sulfatos são as de maior importância (Silva, H., 1993).

As reações que sucedem por ação dos sulfatos originam um aumento do volume do betão. Devido ao seu desenvolvimento, estes produtos não são visíveis de forma imediata, mas sim, algum tempo após o início da sua formação, e terão como consequências nefastas tanto a subida do coroamento da barragem, como deslocamentos radiais para montante e tangenciais para as margens da barragem.

Devido ao processo expansivo, as deformações desenvolvem-se de forma heterogénea ao longo da barragem de betão, com maior incidência nas zonas próximas de água e de temperatura a níveis ideais para o desenvolvimento das reações químicas expansivas. Desta forma, é necessário identificar diferentes zonas ao longo da barragem, com diferentes taxas de expansão ao longo do tempo, para diferentes direções, ou seja, as expansões não ocorrem de uma forma isotrópica para um mesmo ponto. Assim, relativamente às barragens abóbada, é possível identificar que para as compressões mais significativas na zona central da barragem que se desenvolvem segundo os arcos, a maior taxa de expansão é na direção vertical. (Oliveira, S., 2000)

Nos últimos anos, têm sido identificados em todo o mundo o aparecimento de reações álcalis-agregado num número significativo de barragens de betão, que tem motivado o desenvolvimento de estudos laboratoriais e numéricos para a caracterização da sua génese e dos seus efeitos.

2.5.6. OUTROS FENÓMENOS

Devem ainda ser consideradas e analisadas as ações relativas às pressões de injeção e pré-esforço (que dependem do comportamento da estrutura), que podem ser representadas por forças mássicas no corpo da barragem ou por forças superficiais nas juntas.

Por outro lado, devem verificar-se possíveis fatores e fenómenos que podem originar a formação e desenvolvimento de fissuração em barragens de betão, salientam-se entre eles os movimentos da fundação, ciclos de carga-descarga, instalação de pressões hidrostáticas no interior das fendas, diminuição progressiva da capacidade de relaxação de tensões, fenómenos cíclicos de gelo-degelo e do caudal sólido (Portaria n.º 846/93, 1993).

As ações do gelo-degelo da água são importantes caso a obra se localize em períodos ou climas frios, visto que esta ação originara variações de volume nos poros do betão, nas juntas e fissuras da barragem (Portaria n.º 846/93, 1993).

As sub-pressões (SP) podem ocorrer pelo impulso da água infiltrada em fissuras no betão e descontinuidades no maciço de fundação presentes no contacto barragem-fundação.

Os sedimentos acumulados na albufeira, mais propriamente junto ao paramento de montante, poderão conduzir a impulsos adicionais sobre a barragem e condicionar negativamente o funcionamento de alguns órgãos de segurança e exploração da barragem.

2.5.7. COMBINAÇÃO DE AÇÕES / CENÁRIOS

Segundo as Normas de Projeto de Barragens, a segurança da obra deve ser verificada analisando o seu comportamento para cenários correntes e para cenários de rutura, preferindo-se este procedimento, preconizado pela Comissão Internacional das Grandes Barragens, à utilização do conceito de estado limite. Em cenários correntes, as obras não devem sofrer deteriorações apreciáveis para condições normais de exploração. Em cenários de rutura, esta não deve acontecer, mesmo na eventualidade de situações de baixa probabilidade. (Portaria n.º 846/93, 1993)

Assim, e pelo evidenciado, para cenários correntes a resposta da estrutura deve ser maioritariamente de cariz elástico, de forma a permitir minimizar riscos associados, evitando que a vizinhança da fundação não cause perturbações significativas do maciço de fundação, bem como a perda de eficiência da cortina de impermeabilização. Por sua vez, num cenário de rutura, os movimentos dos blocos fissurados da barragem, não devem conduzir ao seu derrubamento nem originar passagens de água em grande quantidade e com grandes velocidades.

No estudo de uma barragem de betão para cenários correntes, devem ser efetuadas combinações de ações que será importante analisar. Assim, as combinações de ações podem ser divididas em Combinações frequentes, Combinações pouco frequentes, Combinações envolvendo o Sismo Base de Projeto e Combinações de ocorrência excepcional.

Combinações frequentes:

- Peso Próprio com juntas abertas: PP
- PP + Pressão Hidrostática para o Nível Pleno de Armazenamento: PP+NPA
- PP + Pressão Hidrostática para o Nível mínimo de Exploração Normal: PP+NmEN
- PP + Pressão Hidrostática para o Nível Pleno de Armazenamento + Variação de temperatura em época fria: PP+NPA+INVM
- PP + Pressão Hidrostática para o Nível Pleno de Armazenamento + Variação de temperatura em época quente: PP+NPA+VERN

- PP + Pressão Hidrostática para o Nível mínimo de Exploração Normal + Variação de temperatura em época quente: PP+NmEN+VERN

Combinações pouco frequentes:

- PP + Pressão Hidrostática para o Nível de Máxima Cheia: PP+NMC
- PP + Pressão Hidrostática para o Nível de Máxima Cheia + Variação de temperatura em época fria: PP+NMC+ INVM
- PP + Pressão Hidrostática para o Nível mínimo de Exploração Extraordinário + Variação de temperatura em época quente: PP+NmEE+VERN

Combinações envolvendo o Sismo Base de Projeto:

- PP + Pressão Hidrostática para o Nível Pleno de Armazenamento + Variação de temperatura em época fria + Sismo Base de Projeto: PP+NPA+INVN+SBP
- PP + Pressão Hidrostática para o Nível mínimo de Exploração Normal + Variação de temperatura em época quente + Sismo Base de Projeto: PP+NmEN+ VERN+SBP

Combinações de ocorrência excepcional:

- PP + Albufera vazia + Variação de temperatura em época quente: PP+Albufera Vazia+VERN

2.6. DEFINIÇÃO GEOMÉTRICA DAS BARRAGENS ABÓBADA

A definição geométrica de uma barragem abóbada tem como objetivo principal, a conceção da configuração de forma estrutural mais otimizada, para que a estrutura apresente o melhor comportamento estrutural relativamente a diferentes solicitações possíveis. A curvatura horizontal de uma barragem abóbada é idealizada para que a linha de pressões da componente horizontal dos esforços se localize o mais próximo possível do centro das suas seções horizontais.

A definição geométrica das barragens abóbada é normalmente efetuada com base num referencial cartesiano Oxyz, em que a origem do referencial é fixada no topo da consola, o eixo Oz é vertical e descendente, e os eixos Ox e Oy horizontais são respetivamente tangentes e normais ao alinhamento apresentado, como se verifica na figura seguinte.

Considerando este referencial, a forma das barragens abóbada pode ser definida por arcos parabólicos horizontais de segundo grau, que são expressos através da equação do traçado da diretriz dos arcos e da equação definidora da variação da espessura dos mesmos, respetivamente $y(x, z)$ e $e(x, z)$. Este tipo de arcos apresenta uma diminuição contínua e gradual da curvatura e como tal proporciona uma melhor transmissão das ações em direção às encostas.

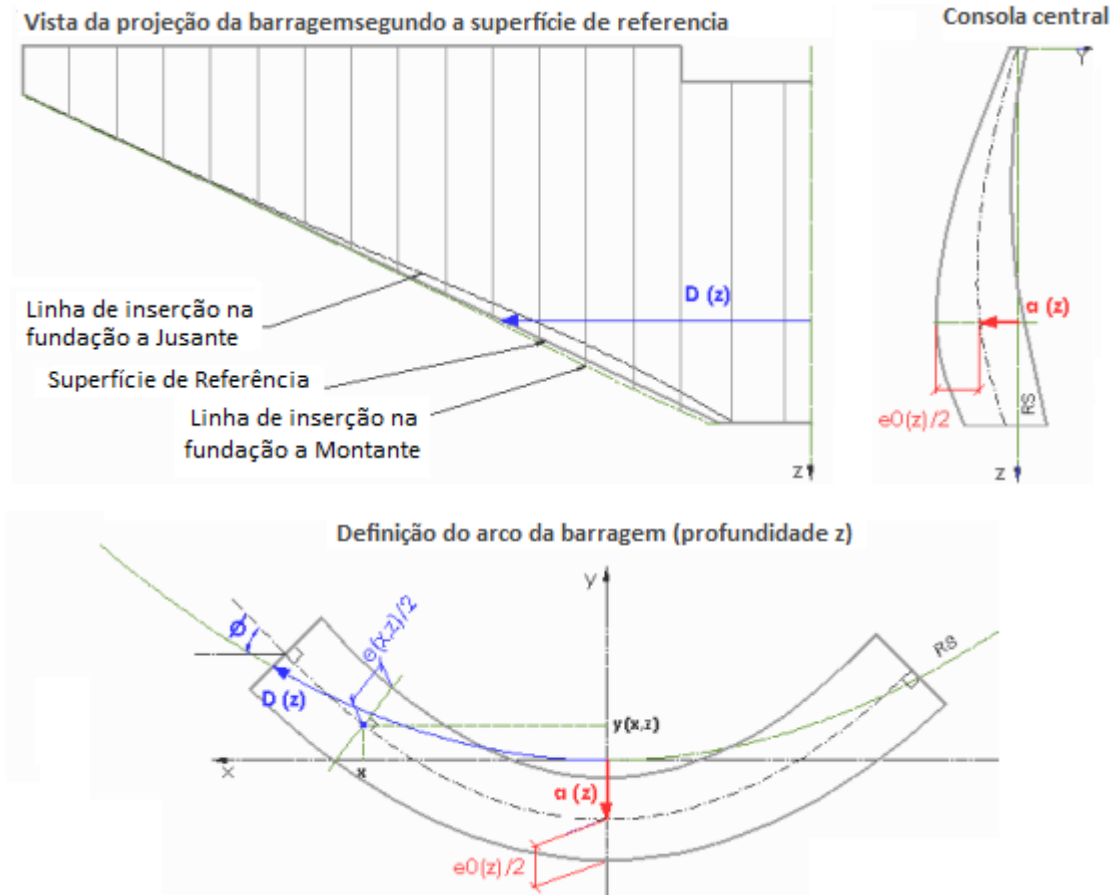


Fig. 17 - Definição geométrica das barragens abóbada (Adaptado de EDP - Paixão,P.;Matos,D.S)

- Definição da diretriz dos arcos

Equação do traçado da diretriz dos arcos à profundidade z:

$$y(x, z) = \frac{x^2}{2 \cdot p(z)} - a(z) \quad (2.1.)$$

A função $p(z)$ representa o raio de curvatura dos arcos no fecho e a função $a(z)$ representa a distância à superfície de referência¹ no fecho, tendo ambas uma definição polinomial do tipo:

$$p(z) = p_0 + \sum_{i=1}^{N_p} (p_i \cdot z^i) \quad (2.2)$$

$$a(z) = \sum_{i=1}^{N_a} (a_i \cdot z^i) \quad (2.3)$$

¹ Superfície regradada de geratriz vertical e diretriz coincidente com o eixo do arco do coroamento.

- Definição dos parâmetros

Equação definidora da espessura da barragem medida radialmente à diretriz a uma profundidade z num ponto de abscissa x :

$$e(x, z) = e_0(z) \cdot \left[1 + A(z) \cdot \left(\frac{x}{100} \right)^2 \right] \quad (2.4.)$$

A função $e_0(z)$ representa a espessura da consola de fecho e $A(z)$ representa a variação de espessura, sendo também definidas

$$e_0(z) = e_0^c + \sum_{i=1}^{N_e} (e_i \cdot z^i) \quad (2.5.)$$

$$A(z) = A_0 + \sum_{i=1}^{N_A} (A_i \cdot z^i) \quad (2.6.)$$

E ainda o raio de curvatura pode ser equacionado pela seguinte expressão:

$$R(x, z) = p(z) \cdot \left[1 + \left(\frac{x}{p(z)} \right)^2 \right]^{3/2} \quad (2.7.)$$

Em geral, os arcos possuem grande curvatura no seu fecho, o que origina um maior efeito de arco na zona central da barragem, local em que apresenta espessuras mais diminutas.

No capítulo 6, será abordado, através no programa ANSYS, o estudo numérico da definição geométrica de barragens abóbada com elementos finitos tridimensionais.

3

REFRIGERAÇÃO DE BARRAGENS DE BETÃO

3.1. CONSIDERAÇÕES INTRODUTÓRIAS

Para se proceder à execução das injeções das juntas de contração em barragens de betão, é necessário em determinados períodos de construção, recorrer a um processo de refrigeração artificial para contrariar o aumento de temperatura, resultando essencialmente da libertação do calor de hidratação do cimento.

Em geral, este sistema de refrigeração baseia-se na circulação de água refrigerada ou não, em circuito fechado, num sistema composto por condutas principais e condutas distribuidoras, das quais ramificam as serpentinas de refrigeração, ou seja, condutas de menores diâmetros localizadas nas camadas de betonagem e de forma a abranger toda a massa de betão que compõem a barragem a ser construída. Este processo de abaixamento artificial das temperaturas de betão é efetuado em três etapas importantes: a primeira, aquando do betão fresco, ao controlar e limitar a temperatura de colocação do betão; após a colocação do betão, com o objetivo de acautelar o aumento da temperatura proveniente do pico de libertação de calor de hidratação, e por fim, de forma a realizar convenientemente a injeção das juntas de contração da barragem, procede-se ao arrefecimento final para estabilizar as temperaturas do betão próximas das temperaturas de injeção recomendadas. Assim, é usual centralizar este processo a dois níveis, em pré-refrigeração e pós-refrigeração, como será detalhado mais à frente.

Após a colocação do betão, a primeira refrigeração é efetuada através da circulação de água do rio pelas serpentinas para acautelar e condicionar o aumento inevitável da temperatura do betão durante a betonagem da barragem.

Posteriormente e antes do término de betonagem da barragem realiza-se a segunda refrigeração, ou seja, a refrigeração final da barragem sendo utilizada em geral água refrigerada.

3.2. MÉTODOS DE ARREFECIMENTO DO BETÃO

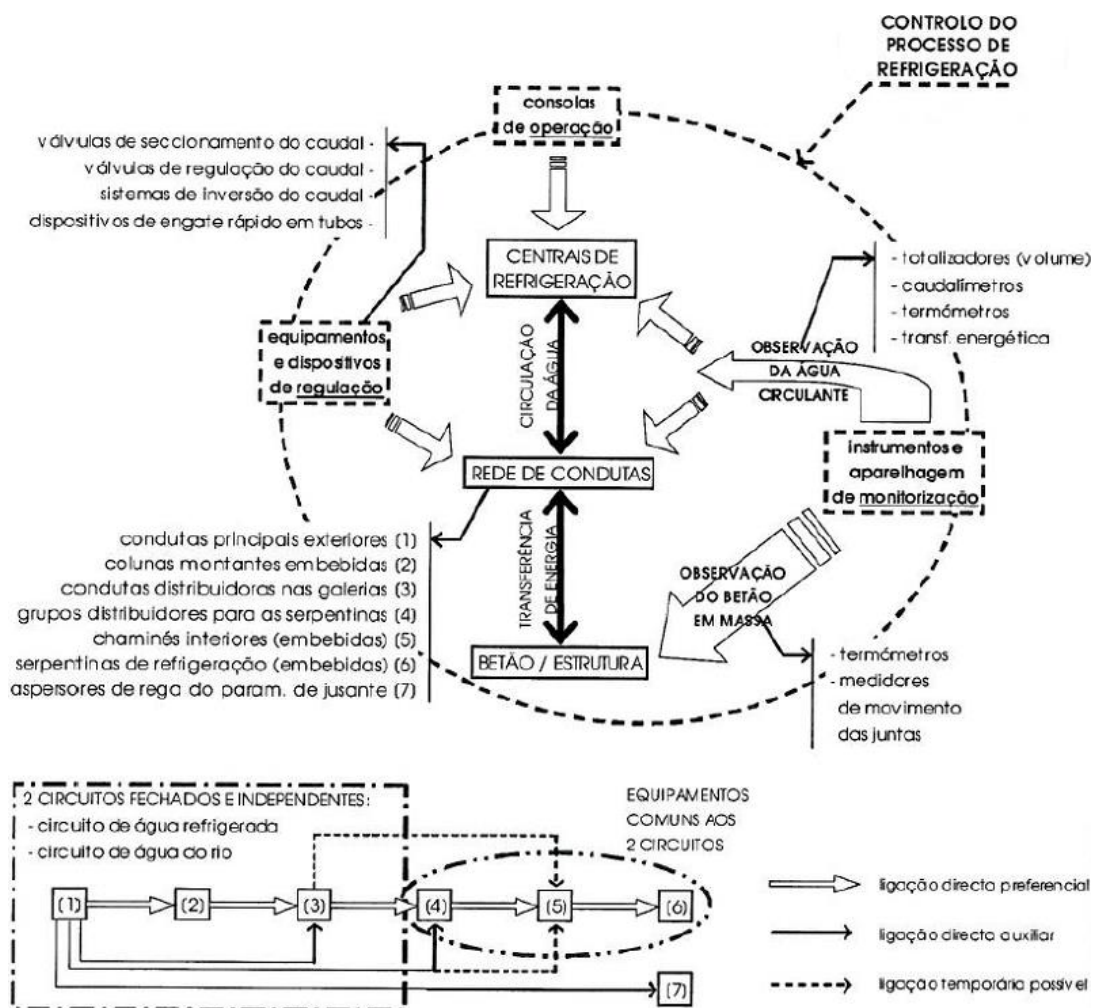
Na execução de uma barragem de betão é ponto assente que o controlo e verificações sucessivas das variações de temperatura do betão são aspetos muito importantes a ter em conta. As principais situações que condicionam a temperatura do betão fresco são os efeitos causados pelas condições climatéricas e pela radiação solar, pelo que é essencial requerer medidas para proteger os materiais constituintes do betão, com o objetivo de reduzir a temperatura do betão fresco para valores em geral inferiores a 25°C.

Entre o quarto e o vigésimo dia após a colocação do betão, recorre-se ao arrefecimento artificial com a circulação de água do rio pelas serpentinas em Polietileno de Alta Densidade (PEAD) que estão instaladas no corpo da barragem de betão (1ª refrigeração) que permitirá adicionalmente, contrariar o aumento de temperatura, neste caso, provocado pelo calor libertado aquando da hidratação do ligante. Cada serpentina terá a função de refrigerar um volume de betão na ordem de grandeza do produto da área de influência pelo comprimento da serpentina (EDP - Estudo de refrigeração da Barragem do Baixo Sabor).

De modo a atingir com uma maior rapidez e de forma controlada a temperatura final pretendida para proceder-se à injeção das juntas dos blocos da barragem, é utilizado um arrefecimento acelerado através da circulação de água refrigerada a 4°C (2ª refrigeração). O conjunto das duas fases de refrigeração compõe assim a pós-refrigeração associada à barragem.

3.3. SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO ARTIFICIAL DE UMA BARRAGEM DE BETÃO

No esquema 7, é apresentado um possível sistema de refrigeração artificial de uma barragem de betão, sendo definidos os equipamentos e dispositivos de regulação bem como os instrumentos e aparelhagem de monitorização utilizados para o efeito.



Esquema 7 - Esquema de refrigeração artificial dos betões de barragens de betão (EDP, 2007b)

3.4. TEMPERATURA DO BETÃO FRESCO

Durante a construção de uma barragem de betão é necessário controlar a sua temperatura de modo a evitar eventuais fissuras e a criar condições para que o processo de injeção das juntas se proceda com os betões a uma temperatura inferior, em alguns graus, à temperatura média anual do ar – 9 a 12°C.

A pré-refrigeração permite baixar a temperatura de colocação do betão. Esta redução da temperatura é conseguida através da protecção térmica dos agregados e dos silos de cimento, por uma pré-refrigeração dos agregados que se traduz num processo mais eficiente, todavia mais caro, e pela utilização de água refrigerada e/ou de gelo na água de amassadura do betão.

A temperatura do betão fresco é influenciada essencialmente pela temperatura do ar, pela temperatura da água de amassadura do betão, do ligante e dos agregados e ainda, devido ao atrito interno e pelos processos posteriores de colocação e compactação que serão empregues na barragem.

No caso de ser utilizada água do rio como água de amassadura, é necessário ter em atenção que a temperatura nestas águas correntes possui maior valor e variação junto à superfície e vai reduzindo em profundidade, motivo pelo qual é benéfico recorrer-se a captações em profundidade, assegurando assim as características próximas das pretendidas.

A refrigeração da água de amassadura deve ser controlada para que se cumpra as temperaturas finais recomendadas para o betão fresco. A sua temperatura deve ser sensivelmente constante, entre 3 °C e 4°C, ou, caso seja necessário, pode substituir-se parcialmente a água por gelo moído, num processo que vise a sua otimização, visto que a utilização de gelo acarreta grandes gastos de energia.

A temperatura do ligante embora atinja valores elevados, na ordem dos 50 a 60°C, representa uma pequena parcela da massa total do betão, podendo ser reduzida com a adição de cinzas volantes ao cimento, visto que contribuem para uma diminuição do calor de hidratação da mistura.

Os agregados podem representar valores até aproximadamente 85% do volume da massa do betão utilizada, motivo pelo qual a sua temperatura condiciona preponderantemente a temperatura do betão fresco. Quando os agregados são devidamente protegidos, a sua temperatura é considerada equivalente à temperatura do ar, encontram-se em equilíbrio térmico. Assim, caso seja necessário reduzir a temperatura dos agregados em relação à temperatura do ar, em épocas quentes, é usual regar os silos de agregados com água.

No entanto, dependendo das soluções a utilizar, do investimento que será necessário realizar para a sua implementação e das dimensões da obra e suas necessidades, são expostos seguidamente alguns exemplos de refrigeração dos agregados praticados nas grandes obras:

- Protecção dos inertes à temperatura ambiente (1ª Fase do ciclo), com coberturas adequadas, sendo a melhor opção em silos enterrados;
- Mergulho das britas em tanques de água fria a temperaturas próximas dos 0°C, permanecendo os mesmos mergulhados durante um determinado tempo e, posteriormente escorridos;
- Arrefecimento por injeção de ar frio (aproximadamente a 2°C) ascendente nos silos e tolvas de inertes;
- Rega permanente das britas com água gelada, estando estas a passar numa passadeira a baixa rotação e dentro de uma cabine climatizada com temperaturas máximas compreendidas entre os 3 e os 4°C.

A temperatura do betão pode ainda aumentar durante o seu fabrico, devido ao atrito interno e ao trabalho mecânico e, mais tarde, na fase de colocação e vibração do mesmo, pelo que poderá ser necessário uma refrigeração do betão pelos métodos já antes expostos.

De acordo com as temperaturas anteriormente referenciadas, a temperatura do betão fresco pode ser determinada, no momento da amassadura, pela seguinte equação:

$$T = \frac{0,22 \times (T_{agregados} \times W_{agregados} + T_{ligante} \times W_{ligante}) + T_{água} \times W_{água}}{0,22 \times (W_{agregados} + W_{ligante}) + W_{água}} \quad (3.1)$$

Nesta expressão, o fator 0,22 é a razão do calor específico das componentes secas em relação ao da água, T e W são as temperaturas e a massa por unidade de volume de betão de cada componente respetivamente.

A equação acima exposta e a designação de cada componente foram obtidas do Estudo de refrigeração da Barragem do Baixo Sabor e da referência bibliográfica (Inque, G., 1986).

3.5. PÓS-REFRIGERAÇÃO

Verificando-se que as reações de hidratação do cimento originam um aumento de temperatura do betão, e que, devido aos ritmos de betonagem, ao efeito das cofragens e dos blocos laterais e às espessuras da barragem, preponderantemente na seção de cota mais baixa, o arrefecimento do betão torna-se lento. Este processo deve-se ao efeito que a temperatura do ar causa na grande massa de betão, até atingir o equilíbrio térmico com esta, tornando-se um processo muito moroso, e como tal é necessário realizar uma pós-refrigeração do betão.

A pós-refrigeração do betão dos blocos da barragem é efetuada através de duas fases de refrigeração artificial, por intermédio da circulação de água do rio (com valores de temperatura entre 13 a 15°C) e da circulação de água refrigerada (valores de temperatura entre 3 a 4°C) pelas serpentinas que estão embebidas no betão.

A primeira fase de refrigeração é iniciada com a betonagem dos blocos da barragem (entre o 4º e o 20º dia). Este arrefecimento artificial dos betões é conseguido através da circulação de água do rio pela rede de serpentinas, instaladas aquando do processo de betonagem, originando uma diminuição da temperatura, em geral da ordem de 0,4 a 0,6°C/dia.

Embora de reduzido valor, após esta fase, o processo de libertação de calor continua e, consequentemente, o arrefecimento natural culminará em equilíbrio térmico com as condições ambientais. O arrefecimento natural do betão da barragem torna-se proporcional à idade do betão e à espessura da barragem, na medida em que em diferentes zonas da barragem (junto à fundação ou no coroamento da abóbada) verificam-se diferentes condições.

A segunda fase de refrigeração é realizada precedentemente à realização da injeção das juntas de contração dos blocos, pretendendo-se assim otimizar esta atividade. Este tipo de arrefecimento artificial utiliza água refrigerada como forma de proceder a ajustes térmicos mais acentuados de modo a evitar tensões localizadas em zonas sensíveis da estrutura. Porém, é usualmente feita de forma faseada devido às grandes massas de betão passíveis de serem refrigeradas.

Como pretendido, a redução da temperatura de colocação do betão influencia a sua temperatura máxima atingida, reduzindo-a. Como se verifica na Fig.18, que esquematiza simplificada a evolução térmica de uma camada de betonagem da barragem durante a sua construção, verifica-se que o arrefecimento do betão durante a primeira fase de refrigeração, traduz-se por ser um processo lento e

gradual, a partir do qual se procede ao arrefecimento forçado do betão, com o objetivo de atingir as temperaturas do betão próximas das temperaturas de injeção recomendadas (período T4).

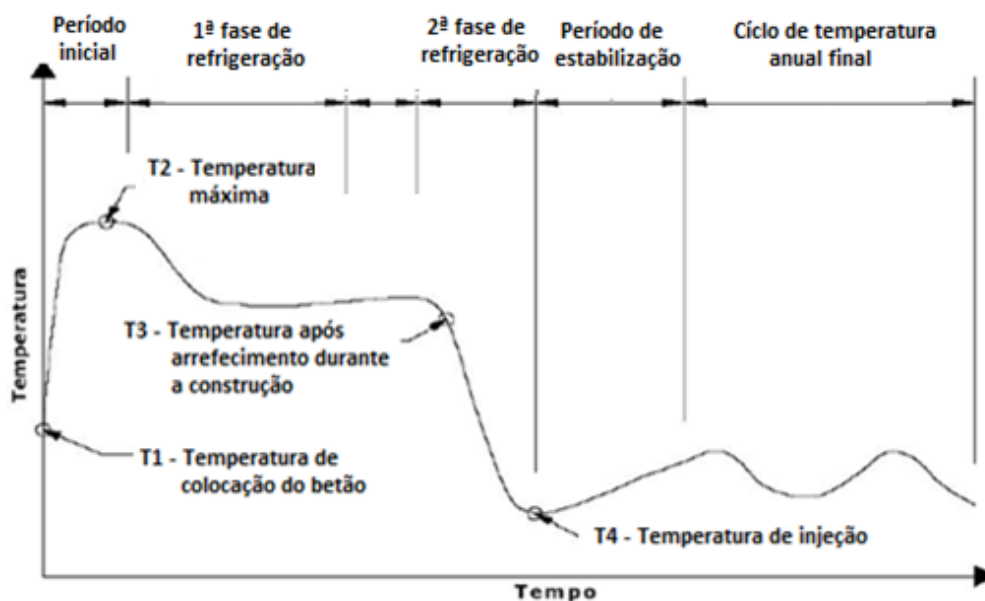


Fig. 18 - Esquema elucidativo da evolução térmica durante a construção de uma barragem abóbada com arrefecimento artificial (adaptado de U.S. Army Corps of Engineers, 1994)

Caso não se aplicasse um arrefecimento forçado através de refrigeração artificial, a evolução térmica de uma barragem abóbada seria idêntica à apresentada na figura 19.

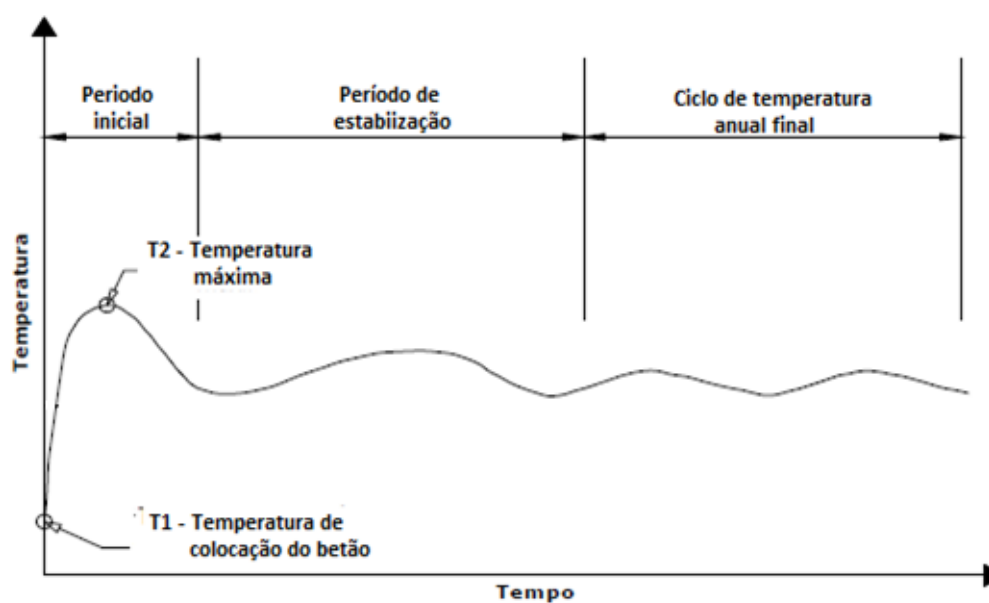


Fig. 19 - Esquema elucidativo da evolução térmica durante a construção de uma barragem abóbada sem arrefecimento artificial (adaptado de U.S. Army Corps of Engineers, 1994)

A utilização de pós-refrigeração terá de ser tal que não provoque acentuadas variações térmicas capazes de originar tensões internas e consequentemente fissurações na barragem, bem como não permita atingir temperaturas que condicionem as características e a qualidade do material.

Por outro lado, as descontinuidades entre níveis de betonagem da barragem (“juntas frias”) são outro ponto importante a ser analisado, visto que existem diferentes temperaturas e diferentes idades entre os dois tipos de betões colocados em contato. Estas descontinuidades podem situar-se em local propício ao desenvolvimento de fissuração do betão. Deve existir um tratamento específico da junta, caso a aderência entre as duas faces de betão colocadas em contato não seja garantida, e para tal deve ser prevista a interposição de argamassa de ligação e/ou armaduras devidamente ancoradas para resistirem a esforços de tração.

3.6. PROGRAMAÇÃO E MONITORIZAÇÃO DO PROCESSO DE REFRIGERAÇÃO

A monitorização do processo de refrigeração da barragem deve ser efetuada de forma a controlar, medir e registar os valores afetados à variação da temperatura e do caudal da água presente no sistema de refrigeração bem como da abertura das juntas de contração, que vão variando naturalmente com o efeito da refrigeração.

A primeira fase de refrigeração é executada entre o quarto e o vigésimo dia após a betonagem dos blocos da barragem, com a circulação de água do rio pelas serpentinas que compõem o sistema de refrigeração. Esta primeira refrigeração é importante no controlo contínuo da temperatura do betão pois existe uma grande variação das temperaturas da água e betão, e desta forma minora substancialmente efeitos provocados pela hidratação do ligante.

A segunda fase de refrigeração é realizada por dois sistemas diferentes: um, com a circulação de água do rio e, outro, com água refrigerada (temperatura da ordem dos 4°C). Por outro lado, o tempo de refrigeração varia com a zona da barragem, época da betonagem e período decorrido. Em geral, as zonas de maior espessura necessitam de um maior tempo de refrigeração.

Após este procedimento, caso seja necessário recorrer a injeções secundárias de juntas, ou seja, reinjeções, estas poderão ocorrer numa fase posterior ao enchimento da albufera.

4

INJEÇÃO DE JUNTAS DE CONTRAÇÃO DE BARRAGENS ABÓBADA

4.1. CONSIDERAÇÕES INTRODUTÓRIAS

O quarto capítulo foca-se no processo de injeção das juntas de contração de barragens abóbada, bem como nos aspetos construtivos e dispositivos necessário para a injeção.

Na construção de barragens abóbada com betões convencionais é necessário realizar juntas de contração, possibilitando desta forma a contração do betão devido à dissipação do calor. É recomendado que as juntas adotem um espaçamento entre blocos verticais de aproximadamente 15 metros. Usualmente, e como referido no Regulamento de Betões em Ligantes Hidráulicos (1989), “a proporção das dimensões dos blocos, em planta, não deve exceder a relação 3:1, não devendo a menor dimensão ser superior a 15m” (Decreto-Lei n.º 445/89, 1989).

As juntas de barragens de betão são realizadas em planos verticais, normais à superfície de referência ou normais à diretriz do arco a cada cota o que origina uma superfície torsa. As juntas de contração podem ter formas diversas dependendo do tipo de barragem. Sempre que possível, é pretendido a regularidade e simetria da estrutura relativamente às juntas, sendo aconselhável a sua perpendicularidade quando se aproximam da base da barragem até às fundações, evitando-se assim, os ângulos de reduzida amplitude entre os planos das juntas e a superfície da fundação.

Como as barragens abóbada requerem o monolitismo dos blocos constituintes da sua estrutura, recorre-se à execução do enchimento das juntas de contração com caldas de cimento. Para a injeção das juntas são materializados compartimentos estanques, com o recurso a lâminas horizontais de Policloreto de Polivinila (PVC), que são distanciadas em altura, criando os compartimentos principais. Com o objetivo de assegurar a impermeabilização, são realizadas, normalmente no bordo de montante das juntas, duas lâminas equidistantes. O conjunto destas duas lâminas e das lâminas horizontais de PVC referidas anteriormente, formam os compartimentos de paramento.

Os fenómenos que influenciam a contração do betão das barragens têm de ser considerados tanto no período de colocação do betão como no período posterior. Para tal recorre-se a aspetos construtivos específicos como, por exemplo, a composição do betão, o controlo das variações de temperatura do betão ao longo do processo construtivo, o processo de cofragem e a necessidade ou não da utilização de arrefecimento artificial no betão da barragem.

Os caixotões (“shear boxes”) são os recortes que as juntas de contração possuem, para proporcionar o imbricamento entre blocos contínuos.

Assim, os caixotões estão localizados na superfície de interface dos blocos da barragem para proporcionar o efeito de continuidade e monolitismo da estrutura e, genericamente, adotam formas aproximadamente quadradas ou retangulares, transmitindo com maior uniformidade os esforços.

4.2. MATERIAIS DE INJEÇÃO

Os materiais constituintes das caldas de injeção das juntas de contração em barragens do tipo abóbada são areias, cimentos, água e adjuvantes. Em Portugal, os materiais utilizados devem satisfazer as regulamentações e prescrições legais que constam nos decretos de lei bem como nas especificações do LNEC.

De acordo com o Estudo do Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor, no capítulo de injeção das juntas da barragem do escalão de montante, é referido que a injeção das caldas de cimento é feita com suspensão coloidal água:cimento com ou sem adjuvantes ou com argamassa de cimento, ativadas mecanicamente em aparelhos de alta turbulência. As injeções primárias devem cumprir o critério de máxima densidade compatível com os procedimentos de injeção. Na injeção dos compartimentos são utilizadas caldas com densidade sucessivamente crescente, procurando-se atingir uma mistura binária água:cimento de 1:2. Para tal, devem utilizar-se equipamentos e dispositivos de injeção adequados ao cumprimento desta mistura, admitindo uma pressão máxima de injeção de 5 bar. Caso sejam realizadas injeções secundárias, estas devem ser efetuadas a partir dos circuitos com instalação de válvulas, com caldas adequadas ao tipo de válvula utilizada. Neste caso, as caldas a aplicar devem assegurar uma resistência à compressão mínima de 12MPa aos 28 dias de idade, determinadas em cubos de 10cm de aresta ou cilindros de 10cm de diâmetro de altura. No início dos trabalhos de injeção, é importante que se realizem ensaios sobre misturas de caldas de injeção que se prevê utilizar, para a determinação da sua composição e comportamento relativamente à viscosidade Marsh, exsudação, densidade, retração da parte sólida durante a maturação e a resistência mecânica em compressão aos 28 dias de idade. Há que garantir, em qualquer tipo de calda de injeção, que a sua temperatura não ultrapasse os 25°C nem seja inferior a 10°C. (EDP, 2007a).

4.3. FASE DE INJEÇÃO DE JUNTAS DE BARRAGENS

O processo de injeção das juntas de contração de barragens abóbada poderá ser realizado por diferentes estratégias de injeção com o objetivo de provocar um efeito de pré-esforço nos arcos da barragem. Para se obter a monolitização da estrutura é necessário injetar uma calda de cimento a uma dada pressão para que a calda preencha a junta na sua totalidade. É usual iniciar-se este procedimento com a injeção dos compartimentos inferiores, mantendo as características de simetria da barragem e resistências benéficas na sua base, realizando-se posteriormente as injeções dos compartimentos superiores.

De salientar, que no momento de injeção da calda de cimento nas juntas, são provocadas pressões que originam deslocamentos positivos dos blocos para montante da barragem, aumentando em direção ao seu topo e apresentando nesta zona o seu máximo valor, como se verifica na Fig.20 (extraída do modelo da Barragem do Alto Lindoso desenvolvido na presente dissertação através do programa ANSYS).

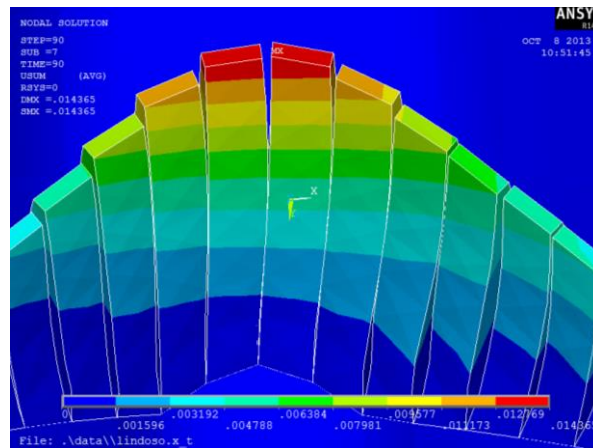


Fig. 20 - Deslocamentos positivos dos blocos para montante da barragem após injeção das juntas da barragem.

Desta forma, ocorrerá um acréscimo das tensões verticais, ou seja, aumento das tensões de compressão na base de montante da barragem e aumento das tensões de tração na base de jusante da barragem.

O processo de injeção de juntas poderá em certos casos ter de ser realizado em duas fases para permitir o início do enchimento da albufeira, contribuindo assim para um tempo mais reduzido de conclusão dos trabalhos, e potenciando uma antecipação da fase de exploração da barragem.

Para se proceder à primeira fase de injeção é preciso que os blocos da barragem se encontrem acima da cota estipulada e que o tratamento de consolidação da fundação dos blocos que confinam as juntas a injetar e os blocos adjacentes estejam concluídos.

A segunda fase é realizada após a conclusão da betonagem de todos os blocos da barragem e inclui o processo de injeção dos restantes compartimentos e de eventuais situações de reinjeção dos compartimentos já injetados na primeira fase.

Este processo de injeção das juntas de contração da barragem tem de cumprir condições ao nível dos períodos de injeção, da temperatura do betão dos blocos, que deverá ser próxima da temperatura de injeção.

4.4. PROCESSO DE INJEÇÃO DOS COMPARTIMENTOS

Conforme já referido, as juntas de contração de uma barragem são divididas por lâminas horizontais formando assim os compartimentos. Como se pode verificar no corte de uma junta tipo com lâminas e dispositivos de injeção (Fig.21), cada compartimento está munido por tubos de injeção e de retorno, sendo a injeção realizada a partir da Galeria Geral de Drenagem (G.D.D) e das Galerias de Visita (G.V.1, G.V.2 e G.V.3). A injeção dos compartimentos situados junto à fundação, designados por compartimentos de fundação, é realizada pela Galeria de Fundação (G.F), cujos circuitos de injeção são providos de válvulas. A injeção realiza-se a partir de jusante.

Nas operações de injeção, cada compartimento principal é munido com dois tipos de dispositivos: um, para a injeção primária, e outro, para possíveis injeções secundárias a efetuar numa fase seguinte.

Os dispositivos a serem utilizados na injeção primárias são constituídos por ranhuras de injeção, ranhuras coletoras, tubos de admissão e tubos de saída respetivamente; os destinados a serem usados nas injeções secundárias, caso esta sejam necessárias, são constituídos por circuitos fechados de válvulas de injeção.

4.4.1. “ENSAIOS COM ÁGUA” DOS COMPARTIMENTOS A INJETAR COM CALDA DE CIMENTO

Antecedendo os trabalhos de injeção propriamente ditos, os dispositivos e as ranhuras do compartimento a injetar são sujeitos a uma lavagem para limpeza e desobstrução dos circuitos, sendo a mesma realizada por injeção de ar e água sob pressão.

De acordo com o Relatório da Empreitada de tratamento da fundação e injeção das juntas de contração da barragem e injeções nos descarregadores de cheia do Escalão do Alto Lindoso, “os ensaios com água consistem no enchimento dos compartimentos, a ensaiar e adjacentes, ficando instaladas pressões da ordem de 0,10 MPa e 0,05 MPa, respetivamente. Estas pressões são controladas através de manómetros colocados à boca dos tubos de injeção e retorno dos compartimentos” (EDP, 1992).

Através dos “Ensaio com Água” é possível:

- identificar os tubos de injeção, retorno e respiro referentes a cada compartimento;
- averiguar se os circuitos de injeção estão a funcionar conforme planeado;
- detetar fugas de água dos compartimentos para os paramentos e/ou para compartimentos adjacentes;
- observar e analisar o grau de abertura da junta.

A execução dos ensaios com água segue uma metodologia idêntica à estratégia prevista para a injeção futura dos compartimentos com calda de cimento. Uma estratégia recomendável é de ensaiar os compartimentos das juntas da barragem por níveis de injeção, de baixo para cima e do fecho em direção às margens. Em alternativa, por exemplo, podem ser ensaiados, inicialmente, os compartimentos referentes à fundação e, posteriormente, os compartimentos da barragem de cima para baixo e das margens em direção ao fecho da barragem, sendo a sequência dos ensaios efetuada por níveis. Posteriormente à realização dos ensaios com água, são analisados os resultados e executados os procedimentos necessários para calafetar as zonas por onde foram registadas as fugas de água.

4.4.2. INJEÇÃO PRIMÁRIA

Após a verificação e análise da operacionalidade dos circuitos de injeção, inicia-se o processo de injeção primária dos compartimentos com calda de cimento de baixa densidade, a pressões controladas. Ao longo desse processo, vai-se aumentando a densidades da calda, até se atingir um traço água/cimento de densidade superior a 1:1, desde que se constate o preenchimento total do compartimento ao traço a utilizar nesse momento. No final, os injetores e coletores serão obturados.

Nas injeções primárias são utilizadas caldas de cimento que poderão conter eventualmente adjuvantes e retardadores de presa. Os traços de água:cimento pretendidos para as caldas de cimento deverão variar sucessivamente e de forma crescente, iniciando-se, como já referido anteriormente em 8:1, e seguindo-se com os seguintes traços 4:1, 2:1, 1:1, 1:1,5, 1:2. De referir que, nos casos em que a abertura média inicial das juntas for igual ou maior que 10 mm, se utiliza argamassa de cimento em detrimento da calda de cimento. Posto isto, a argamassa tem de ser adjuvada por um superplastificante, devido à existência do agregado, para permitir a injeção nos compartimentos de forma eficaz e sem interrupções ou falhas na passagem pelos dispositivos de injeção.

Relativamente às pressões de injeção de um compartimento, estas não deverão ultrapassar os 4 bar. No entanto, será possível utilizar pressões de injeção superiores, caso o estudo de otimização assim o indicar, como, por exemplo, em situações em que não exista um caudal suficiente para a injeção se

realizar a um ritmo de enchimento pretendido, ou quando o compartimento a injetar tiver uma comunicação livre com o compartimento superior e assim seja forçoso injetá-los em conjunto.

Em compartimentos de paramento é normal reduzir a metade o valor da pressão de injeção em comparação com os compartimentos principais, visto que o seu papel é de garantir apenas a impermeabilização das lâminas de estanqueidade presentes no paramento de montante. Assim, permite reduzir eventuais fugas de calda para montante.

De acordo com a Fig.21, verifica-se a existência de uma lâmina de cobre e uma lâmina de aço macio na face de montante e jusante da barragem, respetivamente. Actualmente podem ser usadas duas lâminas PVC na face de montante da barragem e uma na face de jusante, com o objetivo de garantir a estanqueidade da injeção dos compartimentos. Caso se verifique nos ensaios de água, fugas de água dos compartimentos, procede-se inicialmente à injeção da zona compreendida entre as duas lâminas de PVC e posteriormente ao restante compartimento.

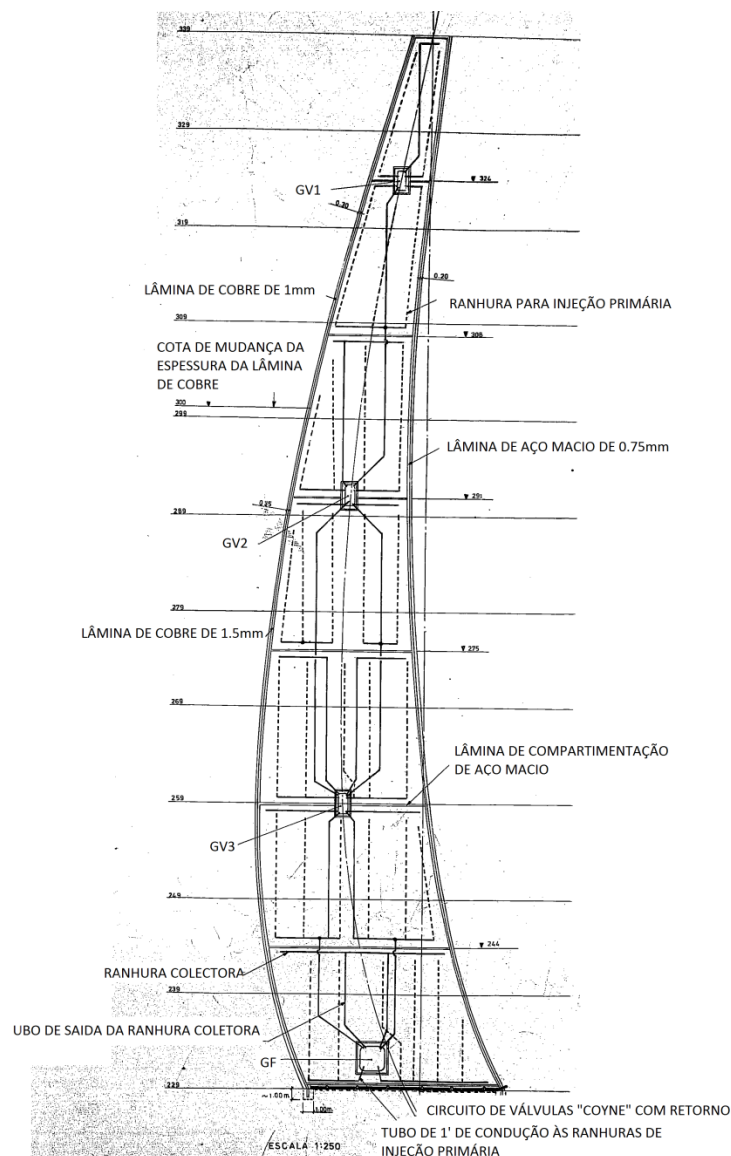


Fig. 21 - Corte vertical de uma junta tipo com lâminas e dispositivos para injeção primária da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977a).

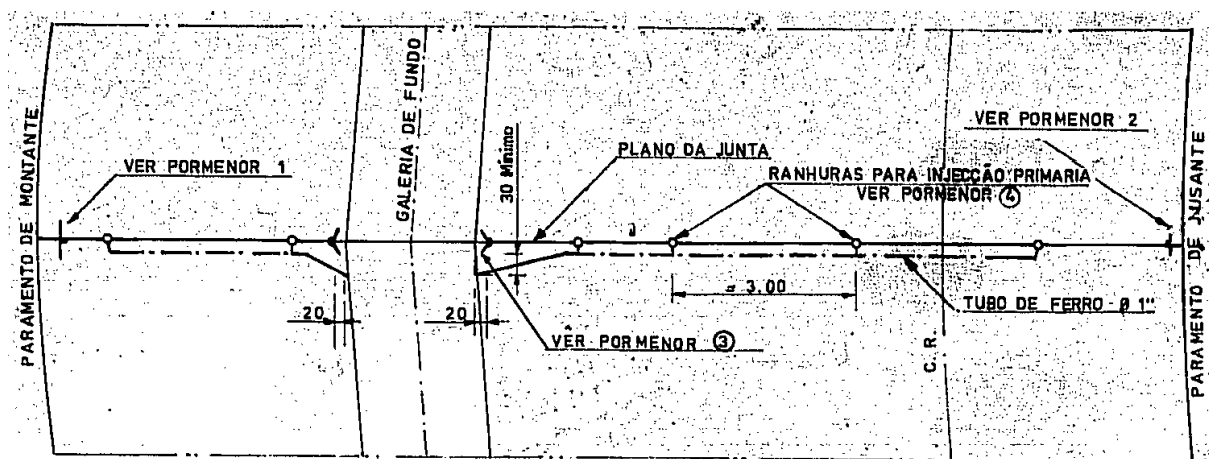


Fig. 22 - Corte horizontal de uma junta com lâminas e dispositivos para injeção primária da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977a).

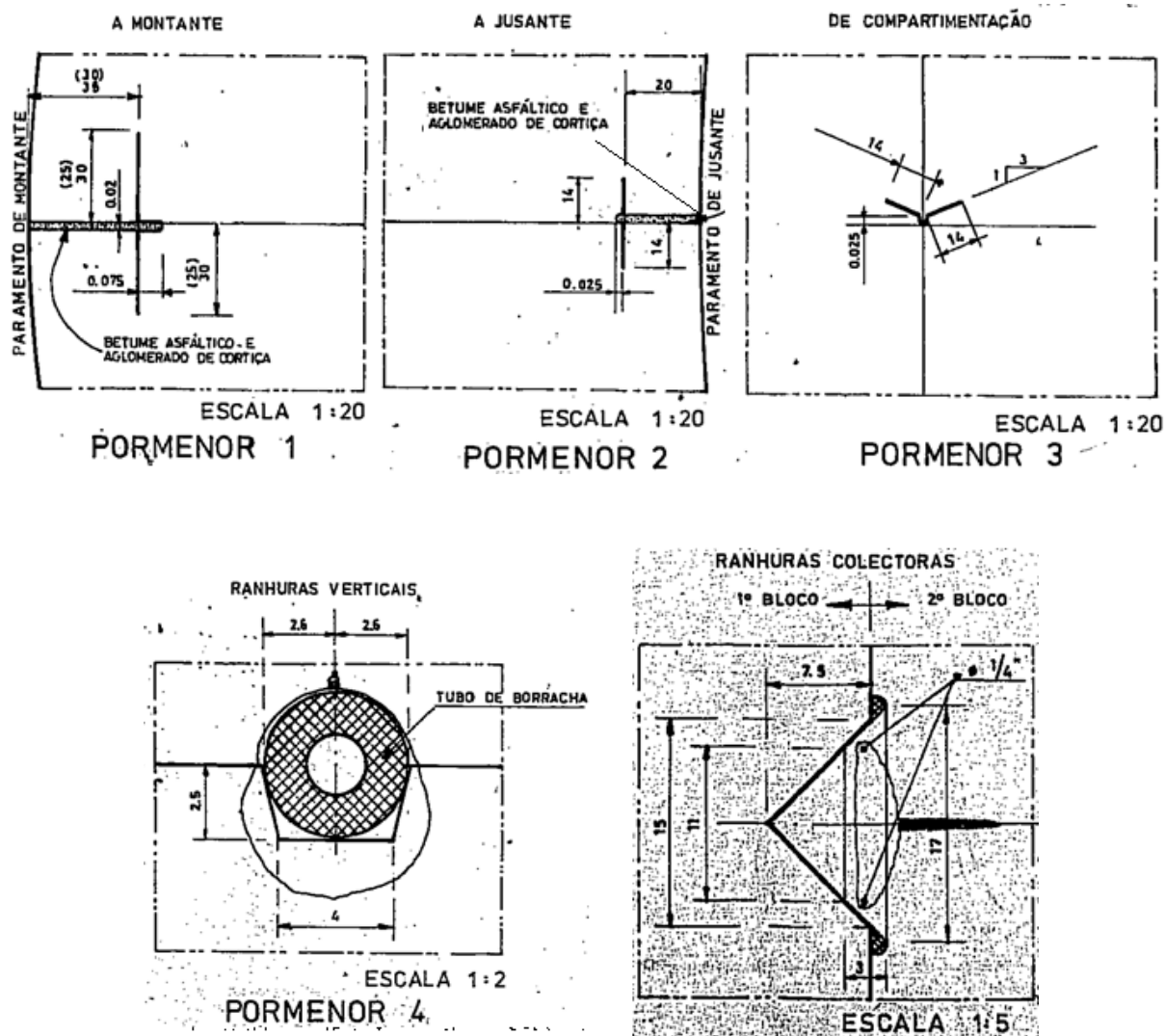


Fig. 23 - Pormenores das lâminas, tubos e ranhuras, a utilizar na junta para injeção primária da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977a).

4.4.3. INJEÇÃO SECUNDÁRIA

A segunda fase das injeções dos compartimentos tem como objetivo a injeção secundária dos compartimentos já injetados na primeira fase, nos casos em que tal se justifique. Assim, é possível reinjetar as juntas da barragem mesmo que esta se encontre em fase de exploração.

As injeções secundárias podem ser realizadas pelo circuito fechado de válvulas deixadas na construção ou pela abertura de furos para os compartimentos a re-injetar.

No primeiro caso, as características das válvulas a utilizar na reinjeção de caldas têm que ter em consideração o tipo de calda a injetar e o programa de injeção secundária previsto.

Para se iniciar corretamente a injeção secundária, pelo segundo caso, é necessário que se proceda previamente a uma fase de verificação das condições existentes, realizando-se possíveis desobstruções que ocorram nos circuitos de injeção, abertura de furos complementares, calafetagem de fugas por imperfeita estanqueidade das lâminas, caso existam, para proporcionar as condições de injetabilidade das juntas desejadas. Assim, tem de se realizar, no topo de cada compartimento, a furação de dois tubos coletores a partir das galerias, sendo um deles orientado para a zona de montante da junta e o outro para a zona de jusante da junta.

4.5. ASPETOS CONSTRUTIVOS DA INJEÇÃO DE JUNTAS DE CONTRAÇÃO

Nesta seção do trabalho, são referidos os procedimentos construtivos a ter em consideração na injeção de juntas com calda de cimento e as indicações para a realização de uma correta execução.

- Instalação prévia dos dispositivos de injeção a serem utilizados tanto na injeção primária como na injeção secundária, sendo estes constituídos, além das lâminas de estanqueidade, por ranhuras de injeção, ranhuras coletoras, tubos de admissão e tubos de saída para o primeiro caso e por circuitos de válvulas de injeção para o segundo.
- No início de cada fase de injeção deve-se efetuar a lavagem dos compartimentos requeridos, utilizando no máximo a água a pressões de 0,2 MPa. No entanto, caso ocorram obstruções ou impedimentos nas juntas que não sejam resolvidos com a água a estas pressões, terá de se recorrer ao método de injeção de ar nas juntas para os solucionar. Seguidamente, realizam-se os respetivos ensaios de água em todos os compartimentos que se pretende injetar, levando-os à saturação com o propósito de se verificar algumas deficiências dos circuitos de injeção. Estes testes são executados durante algumas horas, efetuando-se um aumento progressivo da pressão da água até chegar à pressão estabelecida para a injeção da calda de cimento, a qual deve ser mantida durante 6 horas após o enchimento total de todos os compartimentos. Assim, será fácil de constatar se ocorre ou não perda de água e de pressão, bem como se verifica uma variação da abertura das juntas. E, por fim, de acordo com as falhas e/ou deficiências dos circuitos de injeção, são efetuam as reparações necessárias para colmatar estes percalços. Os testes de água são ainda importantes para determinar a quantidade de calda que será necessária injetar para a abertura correspondente às pressões previstas de acordo com os seus volumes.
- Seguidamente é executada a injeção das juntas com calda de cimento e, sempre que possível, é aconselhável que a injeção deve ser feita de modo simétrico em função do fecho da barragem, visto que se obterá uma distribuição final das tensões na barragem mais rigorosa. A calda de cimento em cada compartimento deve ser injetada de forma a estabilizar na junta e a sua taxa de enchimento na vertical deve ser inferior a 60 cm/minuto.

A calda a injetar inicialmente deve ser de baixa densidade (traço água:cimento de 8:1) a uma pressão média de 2 a 3 bar para proporcionar a humidificação do betão. A partir do momento em que se verificar a sua saída pela ranhura coletora na parte superior do compartimento em injeção, a calda deve ser substituída por uma calda de densidade superior e com a mesma quantidade que foi injetada da anterior. Assim os traços de água:cimento pretendidos devem variar sucessivamente e de forma crescente, iniciando-se em 8:1, e seguindo-se com os seguintes traços 4:1, 2:1, 1:1, 1:1,5, 1:2. Este processo é terminado quando a densidade e a pressão previstas para a calda num dado compartimento forem iguais à saída e à entrada da ranhura coletora. (Genésio, M., 1993)

- Assim, o processo de injeção nas juntas de calda de cimento está totalmente concluído; caso se verifiquem fugas de calda para os compartimentos adjacentes, será feita uma reinjeção da calda, até atingir a pressão de injeção do compartimento.

A injeção de calda de cimento nas juntas de barragens é um tema muito importante na sua construção do ponto de vista estrutural e funcional.

A realização da memória descritiva e dos respetivos desenhos na fase de projeto, deve conter:

- A programação sequencial da injeção bem como dos dispositivos de injeção necessários.
- A definição do período do ano em que a injeção das juntas será efetuada.
- A sequência de injeção dos diferentes compartimentos.
- A definição das pressões a injetar em cada junta em cada compartimento.
- Os valores esperados, devido à injeção da calda nas juntas, para a temperatura do betão em cada compartimento e nos seus confinantes, para a abertura da junta, para os deslocamentos radiais de cada bloco e para os deslocamentos diferenciais entre blocos adjacentes.

5

MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO AO CÁLCULO DE BARRAGENS ABÓBADA

5.1. MODELOS DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE BETÃO

As barragens são grandes e complexas obras de engenharia que acarretam exigências regulamentares especiais ao nível da segurança e para lhes dar cumprimento recorre-se a técnicas e modelos estruturais que simulem e façam uma previsão aproximada do comportamento que estas estruturas poderão apresentar perante certas solicitações.

Com o objetivo de verificar fiavelmente a segurança estrutural, em todas as fases de vida da obra, são utilizados modelos de previsão e de interpretação do comportamento estrutural. Na fase de projeto, são utilizados métodos de análise estrutural que permitem fazer uma previsão do comportamento da barragem de forma a garantir adequados níveis de segurança. Posteriormente, numa fase de exploração, são desenvolvidos modelos que sejam capazes de analisar o comportamento que a estrutura apresenta ao longo do tempo.

Os modelos utilizados podem ser classificados em: modelos numéricos de análise estrutural (método dos elementos finitos e método dos elementos discretos, entre outros), modelos físicos, que se baseiam na Teoria da Semelhança, e modelos de interpretação quantitativa, que são usados como suporte de análise somente na fase de exploração normal.

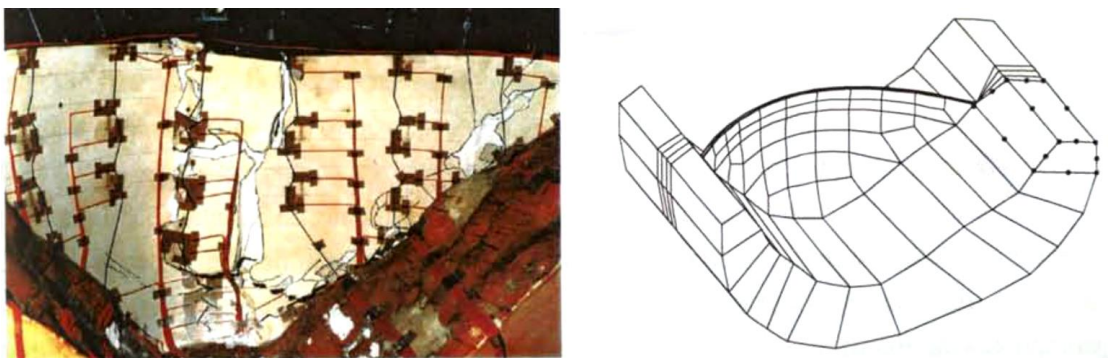


Fig. 24 - Utilização integrada de modelos físicos e de modelos numéricos em estudos da Barragem do Alto Lindoso (Oliveira S., 2000)

A análise do comportamento estrutural de barragens de betão, com modelos numéricos, é um processo que se inicia a partir de modelos simples e vai-se refinando gradualmente o modelo à medida que se vai aprofundando o estudo, permitindo assim a obtenção e análise dos resultados físicos sucessivos, bem como uma modelação e simulação das solicitações e fenómenos mais adversos à estrutura de forma acautelada. Os métodos numéricos, como, por exemplo, o método dos elementos de fronteira, o método dos elementos das diferenças finitas, o método dos elementos discretos, e o método dos elementos finitos, são métodos sofisticados que representam eficazmente parâmetros da estrutura. De entre eles destaca-se, na análise estrutural, o Método dos Elementos Finitos, ao nível de meios contínuos (uma barragem), e o Método dos Elementos Discretos, ao nível de meios descontínuos (o maciço rochoso de fundação). Este trabalho será direcionado para o cálculo estrutural de barragens abóbada pelo Método dos Elementos Finitos.

O Método dos Elementos de Fronteira é descrito pela aplicação da técnica de resíduos pesados na equação diferencial de equilíbrio e, utilizando o Teorema da Divergência (ou de Gauss), é efetuada a integração duas vezes. Este método é eficiente em meios homogêneos com comportamento linear e permite a utilização de elementos de fronteira na análise da interação barragem-fundação-albufera e a discretização da fronteira dessa estrutura.

O Método das Diferenças Finitas é um método de resolução de equações diferenciais de equilíbrio do problema, que são estabelecidas por aproximação de derivadas através de diferenças finitas. Estas equações são aproximadas a partir da formulação presente nas séries de Taylor da função derivada. Este método é limitado ao nível da análise de estruturas com fronteiras irregulares, pelo que foram desenvolvidas formulações através de métodos de integração com o objetivo de representar estas fronteiras com base em discretizações formadas por zonas delimitadas.

O Método dos Elementos Discretos (MED) ou também designado de Método dos Blocos é utilizado no estudo e análise de meios descontínuos, como por exemplo, os maciços rochosos, nos quais podem ocorrer deformações ou movimentos relativos significantes sob solicitações impostas. Este método pressupõe a divisão do domínio de análise em blocos separados por descontinuidades, sendo efetuada a sua formulação pela integração das equações do movimento de cada bloco.

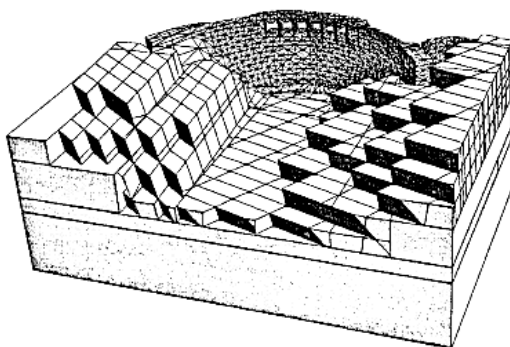


Fig. 25 - Utilização do Método dos Elementos Discretos no estudo do comportamento da barragem de Cambambe (Lemos, V., 1998)

Os modelos físicos ou também designados de modelos reduzidos são usados na análise do comportamento estrutural em condições de serviço e em situações de rotura, podendo-se assim comparar com os modelos numéricos e verificar a fiabilidade neste tipo de análise. A Teoria da

Semelhança é usada neste tipo de modelos, referindo que é possível simular o comportamento de protótipos da estrutura desde que seja conhecido o comportamento de modelos físicos equivalentes ao protótipo. E assim, caso exista uma relação constante entre valores homólogos de um conjunto de grandezas intrínsecas de cada sistema, é possível afirmar que ambos os sistemas são fisicamente semelhantes. Atualmente, os modelos físicos são menos utilizados dada a confiança adquirida nos modelos numéricos.

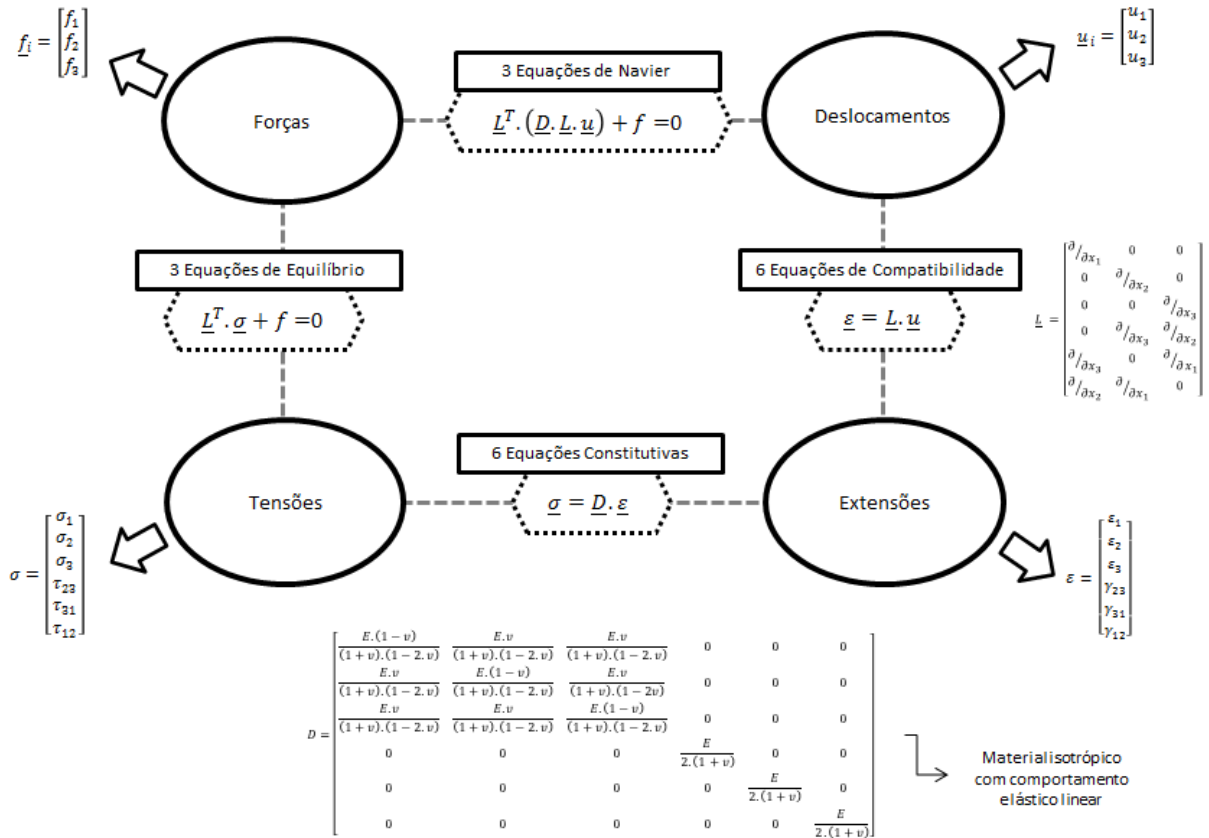
Os modelos de interpretação quantitativa estabelecem funções semi-empíricas entre as grandezas observadas e as solicitações que os originam, com parâmetros a identificar por técnicas estatísticas de minimização de erros, a partir dos resultados observados, que permitem descrever a resposta observada separadamente em cada ponto, como uma soma de várias parcelas que correspondem aos diferentes efeitos envolvidos (Oliveira S., 2000). Segundo a experiência obtida em obras idênticas é verificar em diferentes fases da obra se os resultados observados retratam um comportamento fiável ou anômalo desta. Este modelo possibilita que se verifiquem modificações de comportamento comparativamente ao observado na inerente estrutura; no entanto, não é recomendado utilizar apenas estes resultados como resultados verídicos do seu comportamento. Como é de esperar, o grau de confiança e o rigor dos resultados obtidos a partir deste modelo será melhor, caso se compare este modelo com os modelos numéricos de elementos finitos. Assim, este modelo apresenta-se como sendo um modelo simples e de baixo custo, que permite analisar separadamente os resultados observados dos efeitos das diversas ações.

5.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

As barragens são estruturas que estão sujeitas à aplicação de diferentes tipos de ações ou conjuntos de ações. A análise estrutural de meios contínuos envolve a resolução direta dos sistemas de equações diferenciais, tendo em atenção as necessárias condições fronteira. Como tal, era necessário estabelecer equações diferenciais que traduzissem eficazmente os deslocamentos, extensões e tensões em cada ponto e em cada instante: equações de equilíbrio entre forças e tensões, equações de compatibilidade entre deformações e deslocamentos e equações constitutivas que correlacionam tensões e deformações (Oliveira S., 2000).

Recorrendo ao Método dos Elementos Finitos para a resolução destes sistemas de equações diferenciais parciais e através deste método, é possível transformá-las em sistemas de equações diferenciais ordinárias (torna-se possível a integração numericamente através de métodos matemáticos como, por exemplo, o método de Gauss-Legendre ou Runge-Kutta). O MEF tem a grande vantagem de resolver a estrutura contínua, com base num problema discreto com um determinado número de graus de liberdade. No entanto estas técnicas necessitam de resoluções de sistemas de equações lineares de grandes dimensões que requerem muito tempo para o efectuar.

De forma resumida, são expostas no esquema seguinte, para um problema tridimensional, as equações que relacionam os deslocamentos e forças, extensões e tensões em cada ponto e em cada instante, como se verá mais adiante.



Esquema 8 - Incógnitas e equações fundamentais no equilíbrio tridimensional da Mecânica dos Sólidos (adaptado de Oliveira S., 2003)

No Método dos Elementos Finitos procede-se à divisão da estrutura em elementos finitos que estão ligados nos pontos nodais. O grau de aproximação pretendido para os resultados do problema estrutural é maior e melhor, ou seja, malha mais refinada, com o aumento do número de elementos finitos até um certo valor a partir do qual não fará sentido este aumento. Após esta discretização dos elementos, são obtidas as equações que definem o comportamento de cada elemento, através dos parâmetros impostos para o problema. Este método é usado eficazmente na determinação da distribuição e análise de deslocamentos e tensões em estruturas de geometria e condições de contorno complexas, podendo estas estruturas serem constituídas de materiais isotrópicos ou anisotrópicos. A formulação deste método pode ser em deslocamentos com elementos de compatibilidade, em tensões com elementos de equilíbrio ou mistas com elementos mistos. Seguidamente, é exposta uma figura de uma barragem discretizada em elementos finitos tridimensionais (Oliveira, S., 1991).

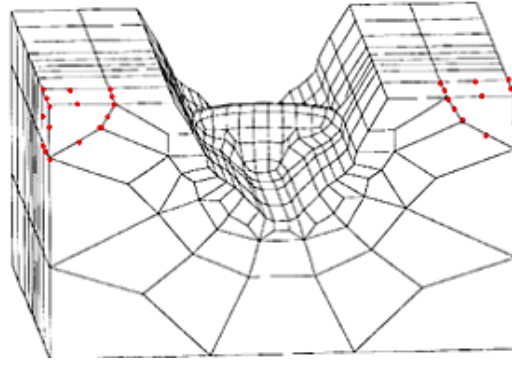


Fig. 26 - Exemplo de Barragem discretizada em elementos finitos tridimensionais (Oliveira, S., 1991).

A realização de um modelo tridimensional pelo Método dos Elementos Finitos necessita que se faça uma idealização da geometria prevista para a estrutura, que se especifiquem as propriedades dos seus materiais e as características das ligações exteriores e das ações aplicadas.

Na modelação estrutural do comportamento de barragens abóbadas admite-se como linear o comportamento geométrico (visto que a distribuição dos esforços não condicionam a variação da sua geometria), e o comportamento dos materiais (visto que se admite linear a relação tensões-extensões dos materiais da estrutura) e como elástico-linear o comportamento das juntas de contração, visto que, perante as ações que solicitam a barragem e considerando a pressão hidrostática como a principal ação atuante, é possível desprezar certas aberturas parciais das juntas de contração. Caso contrário, é passível de se utilizar a hipótese de juntas de contração com grandes aberturas, que se reflete quer em situações que se pretenda efetuar um estudo do desenvolvimento do processo construtivo, quer em situações de estudo sísmico com forças de inércia no sentido de montante, superiores à pressão hidrostática e, conseqüentemente, condicionam a redistribuição das tensões (Batista, A., 1998).

5.3. BASES DA FORMULAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A formulação mais usada no Método dos Elementos Finitos é a que se baseia no método dos deslocamentos, em que se identificam os graus de liberdade de cada ponto nodal, e estes deslocamentos dos nós são as incógnitas do problema.

Para a obtenção destas incógnitas é solicitada a resolução de um integral complexo que abranja um volume V da estrutura. No entanto, este processo pode ser simplificado através do Método dos Elementos Finitos que torna possível decompor a estrutura em vários elementos, ou seja, subdomínios da geometria inicial, e desta forma calcula a equação integral através do somatório de vários integrais anexos a cada elemento (processo de assemblagem).

O Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV) estabelece que o trabalho realizado pelas tensões internas na deformação virtual do corpo é igual ao trabalho realizado pelas forças exteriores nos deslocamentos virtuais dos seus pontos de aplicação (Azevedo, A., 2003). Ou seja,

$$\int_V \delta \underline{\varepsilon}^T \cdot \underline{\sigma} \cdot dV = \int_L \delta \underline{u}^T \cdot \underline{p} \cdot dL + \int_S \delta \underline{u}^T \cdot \underline{q} \cdot dS + \int_V \delta \underline{u}^T \cdot \underline{b} \cdot dV \quad (5.1)$$

Demonstrando que o primeiro membro da equação foca o trabalho interno de deformação, em que $\delta \varepsilon^T$ e σ são os vetores que traduzem esta deformação inicial e a tensão inicial, respetivamente.

No segundo membro da equação, são as forças aplicadas que realizam trabalho externo, em que as três parcelas são referentes às cargas distribuídas por unidade de comprimento, unidade de superfície e unidade de volume.

5.3.1. ELEMENTOS SÓLIDOS TRIDIMENSIONAIS

Na modelação do corpo de barragens abóbada e das suas fundações, é usual serem efetuadas malhas de elementos finitos sólidos isoparamétricos hexaédricos, de 8 e 20 nós, e tetraédricos e proceder-se à comparação dos resultados obtidos por esta discretização com os resultados medidos experimentalmente na barragem.

Nesta formulação dos elementos sólidos tridimensionais são usados hexaedros de 8 nós, visto que possuem as mesmas características do elemento tridimensional adotado na modelagem da estrutura (elemento Solid186 do software Ansys), a mesma formulação matemática (funções de interpolação, notação matricial dos deslocamentos e carregamentos), apenas variando o número de nós que compõem cada elemento. Este elemento é um hexaedro com funções de forma linear (oito nós) e três graus de liberdade, segundo a translação em x, y e z. Como tal é proposta e desenvolvida a formulação para este tipo de elementos.

Os deslocamentos nodais a_i e as forças nodais F_i , considerando como i os pontos nodais do elemento, são representados por vectores (5.2):

$$\underline{a}_i = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ \vdots \\ a_{81} \\ a_{82} \\ a_{83} \end{bmatrix} \quad \underline{F}_i = \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \\ \vdots \\ F_{81} \\ F_{82} \\ F_{83} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Nos elementos sólidos tridimensionais são considerados 3 graus de liberdade por nó e sendo este elemento constituído por 8 pontos nodais, conclui-se que o elemento possui 24 graus de liberdade.

Efetuando-se a substituição de variáveis do sistema de coordenadas do referencial geral

(x_1, x_2, x_3) para o referencial local (s_1, s_2, s_3) dos nós do elemento finito, ou seja,

$$\underline{\bar{x}}_i = \begin{bmatrix} \bar{x}_{11} & \bar{x}_{12} & \bar{x}_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{x}_{81} & \bar{x}_{82} & \bar{x}_{83} \end{bmatrix} \rightarrow \underline{\bar{s}}_i = \begin{bmatrix} \bar{s}_{11} & \bar{s}_{12} & \bar{s}_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{s}_{81} & \bar{s}_{82} & \bar{s}_{83} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

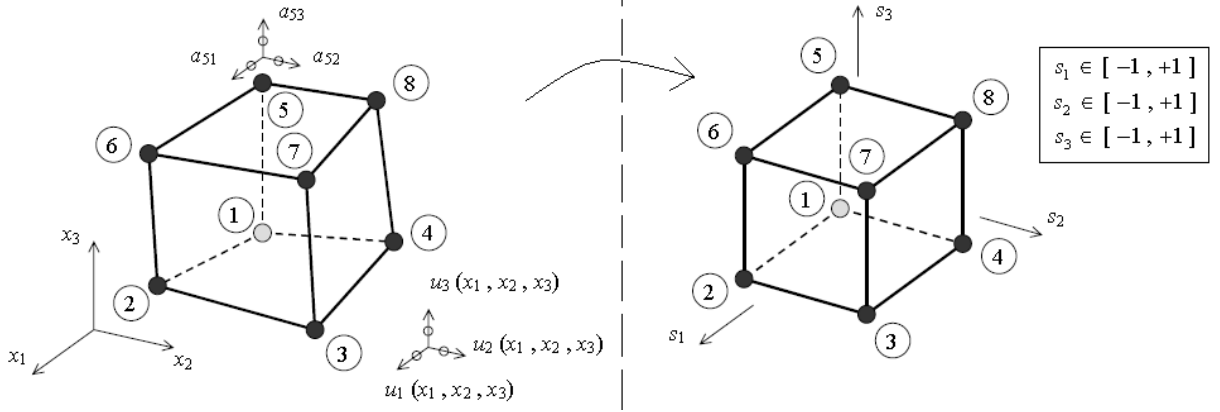


Fig. 27 - Substituição de variáveis do sistema de coordenadas do referencial geral para o referencial local de um elemento sólido tridimensional hexaédrico de 8 pontos nodais (Azevedo, A., 2003)

podem definir-se as funções de forma dos nós do elemento sólido tridimensional (pertencente à família Lagrangeana),

$$N_v = \begin{cases} N_1(s_1, s_2, s_3) = 1/8 \cdot (1 - s_1) \cdot (1 - s_2) \cdot (1 - s_3) \\ N_2(s_1, s_2, s_3) = 1/8 \cdot (1 + s_1) \cdot (1 - s_2) \cdot (1 - s_3) \\ N_3(s_1, s_2, s_3) = 1/8 \cdot (1 + s_1) \cdot (1 + s_2) \cdot (1 - s_3) \\ N_4(s_1, s_2, s_3) = 1/8 \cdot (1 - s_1) \cdot (1 + s_2) \cdot (1 - s_3) \\ N_5(s_1, s_2, s_3) = 1/8 \cdot (1 - s_1) \cdot (1 - s_2) \cdot (1 + s_3) \\ N_6(s_1, s_2, s_3) = 1/8 \cdot (1 + s_1) \cdot (1 - s_2) \cdot (1 + s_3) \\ N_7(s_1, s_2, s_3) = 1/8 \cdot (1 + s_1) \cdot (1 + s_2) \cdot (1 + s_3) \\ N_8(s_1, s_2, s_3) = 1/8 \cdot (1 - s_1) \cdot (1 + s_2) \cdot (1 + s_3) \end{cases} \quad (5.4)$$

Estas funções de interpolação têm como objetivo realizar a interpolação dos deslocamentos e possibilitar a determinação destes deslocamentos no domínio do elemento. As funções devem-se aproximar à deformada do elemento com o objetivo de proporcionar resultados rigorosos. Associa-se a cada ponto nodal i , uma função de interpolação, que toma valor 1 no ponto nodal i e valor 0 nos outros pontos nodais.

Desta forma, procede-se à interpolação das coordenadas cartesianas através da equação,

$$\underline{x} = \sum_{i=1}^{8 \text{ nós}} \bar{x}_i^T \cdot N_i \quad (5.5)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{11} & \cdots & \bar{x}_{81} \\ \bar{x}_{12} & \cdots & \bar{x}_{82} \\ \bar{x}_{13} & \cdots & \bar{x}_{83} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N_8 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Os deslocamentos podem ser obtidos pela expressão $K.a = F$. O comportamento de um elemento num meio contínuo pode ser estudado através das relações existentes entre deformações-deslocamentos e entre tensões-deformações.

Para um dado elemento, as deformações ε podem ser escritas em função dos deslocamentos dos diferentes pontos nodais por meio de um operador diferencial L , independente dos deslocamentos na hipótese de linearidade geométrica. Assim, esta relação é estabelecida através da seguinte expressão:

$$\underline{\varepsilon} = \underline{L} \cdot \underline{u} \quad (5.7)$$

Relativamente ao elemento sólido tridimensional, em que ε e γ são a extensão e a distorção respetivamente, é possível reescrever a equação de uma forma mais explícita,

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x_1 & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial x_2 & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial x_3 \\ 0 & \partial/\partial x_3 & \partial/\partial x_2 \\ \partial/\partial x_3 & 0 & \partial/\partial x_1 \\ \partial/\partial x_2 & \partial/\partial x_1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \\ \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \\ \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \\ \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Num ponto genérico do elemento finito, os deslocamentos $u_m = (u_1, u_2, u_3)$ podem ser obtidos a partir dos deslocamentos dos pontos nodais, $a_{im} = (u_{i1}, u_{i2}, u_{i3})$, através de funções de interpolação, N_i , ou seja, a interpolação do campo dos deslocamentos, u , pode ser efetuada com base na seguinte relação:

$$\underline{u} = \sum_{i=1}^{8 \text{ nós}} \underline{N}_i \cdot \underline{a}_i \quad (5.9)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & \dots & N_8 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \dots & 0 & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \dots & 0 & 0 & N_8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ \vdots \\ a_{81} \\ a_{82} \\ a_{83} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

A matriz de deformação, B , é estabelecida como:

$$\underline{B} = \underline{L} \cdot \underline{N} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & \dots & N_8 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \dots & 0 & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \dots & 0 & 0 & N_8 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x_1} & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x_2} & 0 & \dots & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x_3} & \dots & 0 & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_3} \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x_3} & \frac{\partial N_1}{\partial x_2} & \dots & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_3} & \frac{\partial N_8}{\partial x_2} \\ \frac{\partial N_1}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_1} \\ \frac{\partial N_1}{\partial x_2} & \frac{\partial N_1}{\partial x_1} & 0 & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial x_2} & \frac{\partial N_8}{\partial x_1} & 0 \end{bmatrix}$$

Torna-se possível substituir esta condição na equação que relaciona o campo dos deslocamentos com o campo das deformações, e assim obtém-se,

$$\underline{\varepsilon} = \underline{L} \cdot \underline{u} \rightarrow \underline{\varepsilon} = \underline{L} \cdot \underline{N} \cdot \underline{a} \rightarrow \underline{\varepsilon} = \underline{B} \cdot \underline{a} \quad (5.12)$$

$$\underline{\varepsilon} = \underline{B} \cdot \underline{a} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x_1} & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x_2} & 0 & \dots & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x_3} & \dots & 0 & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_3} \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x_3} & \frac{\partial N_1}{\partial x_2} & \dots & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_3} & \frac{\partial N_8}{\partial x_2} \\ \frac{\partial N_1}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_1} \\ \frac{\partial N_1}{\partial x_2} & \frac{\partial N_1}{\partial x_1} & 0 & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial x_2} & \frac{\partial N_8}{\partial x_1} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ \vdots \\ a_{81} \\ a_{82} \\ a_{83} \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

No entanto, visto que as funções de forma estão definidas no referencial local, deve-se efetuar uma transformação para o referencial global das derivadas parciais da matriz B, com recurso à matriz Jacobiana. O determinante Jacobiano, para o caso tridimensional advém de,

$$J = |J| \rightarrow J = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial s_1} & \frac{\partial x_1}{\partial s_2} & \frac{\partial x_1}{\partial s_3} \\ \frac{\partial x_2}{\partial s_1} & \frac{\partial x_2}{\partial s_2} & \frac{\partial x_2}{\partial s_3} \\ \frac{\partial x_3}{\partial s_1} & \frac{\partial x_3}{\partial s_2} & \frac{\partial x_3}{\partial s_3} \end{vmatrix} \quad (5.14)$$

$$J = |J| \rightarrow J = \left| \bar{x}_{ij}^T \cdot \frac{\partial N_i}{\partial s_j} \right| \rightarrow J = \begin{bmatrix} \bar{x}_{11} & \cdots & \bar{x}_{81} \\ \bar{x}_{12} & \cdots & \bar{x}_{82} \\ \bar{x}_{13} & \cdots & \bar{x}_{83} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial s_1} & \frac{\partial N_1}{\partial s_2} & \frac{\partial N_1}{\partial s_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial N_8}{\partial s_1} & \frac{\partial N_8}{\partial s_2} & \frac{\partial N_8}{\partial s_3} \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Estando o estado de deformação já exposto e com a informação das características do material que está presente no elemento, pode-se proceder à formulação do estado plano de tensão.

Para um dado elemento, admitindo a hipótese de linearidade elástica para o comportamento sendo os materiais isotrópicos, e aplicando a Lei de Hooke generalizada, que relaciona as deformações e as tensões através do módulo de elasticidade, temos

$$\underline{\sigma} = \underline{D} \cdot \underline{\varepsilon} \quad (5.16)$$

Sendo considerado E como o módulo de Young e ν como o coeficiente de Poisson, é possível definir a matriz elasticidade D , para os elementos finitos tridimensionais em estudo, da seguinte forma:

$$D = \begin{bmatrix} \frac{E \cdot (1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} & \frac{E \cdot \nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} & \frac{E \cdot \nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E \cdot \nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} & \frac{E \cdot (1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} & \frac{E \cdot \nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E \cdot \nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} & \frac{E \cdot \nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} & \frac{E \cdot (1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Desta maneira, reescreve-se a equação de uma forma mais explícita, considerando σ e τ como a tensão normal e a tensão tangencial, bem como ε e γ como a extensão e a distorção respetivamente,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)} \cdot \begin{bmatrix} \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)} & \frac{\nu}{(1-2\nu)} & \frac{\nu}{(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{(1-2\nu)} & \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)} & \frac{\nu}{(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{(1-2\nu)} & \frac{\nu}{(1-2\nu)} & \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Através das equações que determinam as deformações e as tensões, é possível determinar a matriz de rigidez do elemento, K_{ijmn} , que significa a força no nó i, na direção m, quando se aplica um deslocamento unitário na direção do nó j, na direção n.

O equilíbrio global de um elemento finito de volume V pode ser expresso pela equação seguinte, em que é representado $\delta\varepsilon$ como o campo de deformações compatível com o campo de deslocamento virtuais δu e as tensões são representadas por σ .

Assim, utilizando o Princípio dos Trabalhos Virtuais, deduz-se a matriz de rigidez e o vetor de solicitação, que se usa no método dos deslocamentos, admitindo que só estão representadas ações distribuídas por unidade de comprimento,

$$\int_V \delta \underline{\varepsilon}^T \cdot \underline{\sigma} \cdot dV = \int_L \delta \underline{u}^T \cdot \underline{p} \cdot dL \quad (5.19)$$

Visto que $\underline{\varepsilon} = \underline{B} \cdot \underline{a}$, então a deformação virtual é $\delta \underline{\varepsilon} = \underline{B} \cdot \delta \underline{a}$, ou seja, $\delta \underline{\varepsilon}^T = \delta \underline{a}^T \cdot \underline{B}^T$

E sabendo que $\underline{u} = \underline{N} \cdot \underline{a}$, logo $\delta \underline{u}^T = \delta \underline{a}^T \cdot \underline{N}^T$

Através destas equações, é possível formular o PTV,

$$\int_V \delta \underline{a}^T \cdot \underline{B}^T \cdot (\underline{D} \cdot \underline{B} \cdot \underline{a}) \cdot dV = \int_L \delta \underline{a}^T \cdot \underline{N}^T \cdot \underline{p} \cdot dL \quad (5.20)$$

$$\int_V \underline{B}^T \cdot \underline{D} \cdot \underline{B} \cdot dV \cdot \underline{a} = \int_L \underline{N}^T \cdot \underline{p} \cdot dL \quad (5.21)$$

O estado plano de tensão pode ser formulado, por comparação entre a equação do PTV simplificada e a equação da rigidez elástica de cada elemento que é usada no método dos deslocamentos ($K \cdot a = F$), ou seja,

$$\int_V \underline{B}^T \cdot \underline{D} \cdot \underline{B} \cdot dV \cdot \underline{a} = \int_L \underline{N}^T \cdot \underline{p} \cdot dL \leftrightarrow \int_V \underline{K} \cdot \underline{a} = \int_L \underline{F} \quad (5.22)$$

Assim, a matriz de rigidez do elemento finito tridimensional será obtida pela equação,

$$\underline{K} = \int_V \underline{B}^T \cdot \underline{D} \cdot \underline{B} \cdot dV \quad (5.23)$$

que resulta, por substituição de variáveis em,

$$\underline{K} = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \underline{B}^T \cdot \underline{D} \cdot \underline{B} \cdot J \cdot ds_1 \cdot ds_2 \cdot ds_3 \quad (5.24)$$

E o vetor de solicitação é obtido por,

$$\underline{F} = \int_L \underline{N}^T \cdot \underline{p} \cdot dL \quad (5.25)$$

Após a determinação, em todos os elementos finitos pertencentes à estrutura, das matrizes de rigidez nos referenciais locais e das condições de compatibilidade e de equilíbrio referentes às forças e aos deslocamentos nos pontos nodais, realiza-se o espalhamento destas matrizes nas posições relativas aos seus pontos nodais, com o objetivo de se determinar a expressão geral da estrutura, ou seja, obtém-se a matriz de rigidez global e o vetor de forças correspondente.

No entanto, é importante que, no processo de assemblagem da matriz rigidez e do vetor das forças aplicadas, se tenha atenção à transformação do referencial local para o referencial global da estrutura.

Esta formulação foi baseada na formulação do MEF presente na bibliográfica de (Pedro, J., 1977) e (Azevedo, A., 2003).

5.3.2. ELEMENTOS FINITOS DE JUNTA

O comportamento das juntas de contração de barragens abóbada pode ser modelado com elementos finitos tridimensionais de superfície. Estes elementos de junta, colocados na interface dos blocos das barragens abóbada, apresentam duas superfícies compostas por um igual número de pontos nodais, sendo usual a utilização de elementos de 6 nós (elementos triangulares) e de 8 ou 16 nós (elementos quadrangulares).

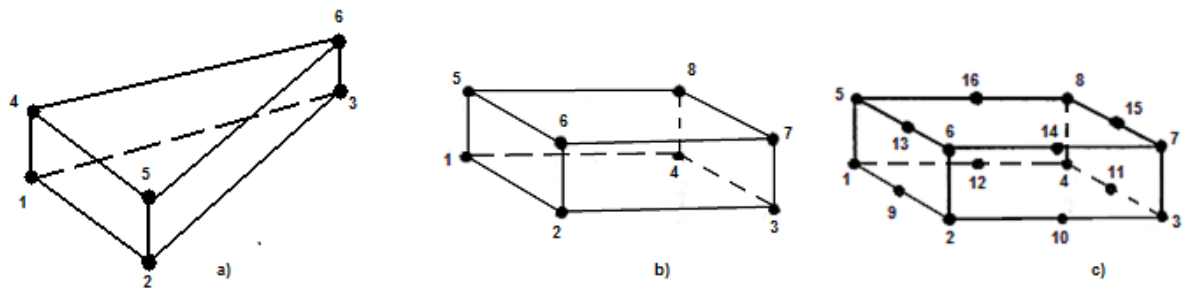


Fig. 28 - Elementos finitos de junta: a) Elemento triangular de 6 pontos nodais; b) Elemento quadrangular de 8 pontos nodais; c) Elemento quadrangular de 16 pontos nodais.

Neste trabalho, são utilizados elementos finitos de junta isoparamétricos hexaédricos, discretizados por 8 pontos nodais. Este elemento de junta deve estabelecer a ligação entre os 4 pontos nodais de cada face dos elementos tridimensionais ligados, permitindo compatibilizar as componentes do deslocamento daqueles pontos nodais na direção normal e tangencial à superfície de contacto. A utilização de elementos de junta de 16 pontos nodais, permitiria obter resultados com uma elevada precisão e compatibilidade com elementos sólidos, todavia necessitaria de uma maior volume de cálculo, o que tornaria este processo mais moroso.

O número de graus de liberdade para cada nó de interface é de seis (3 pares de translações).

Por vezes, estes elementos de junta são definidos com espessura nula entre as duas superfícies, como é possível verificar na figura seguinte:

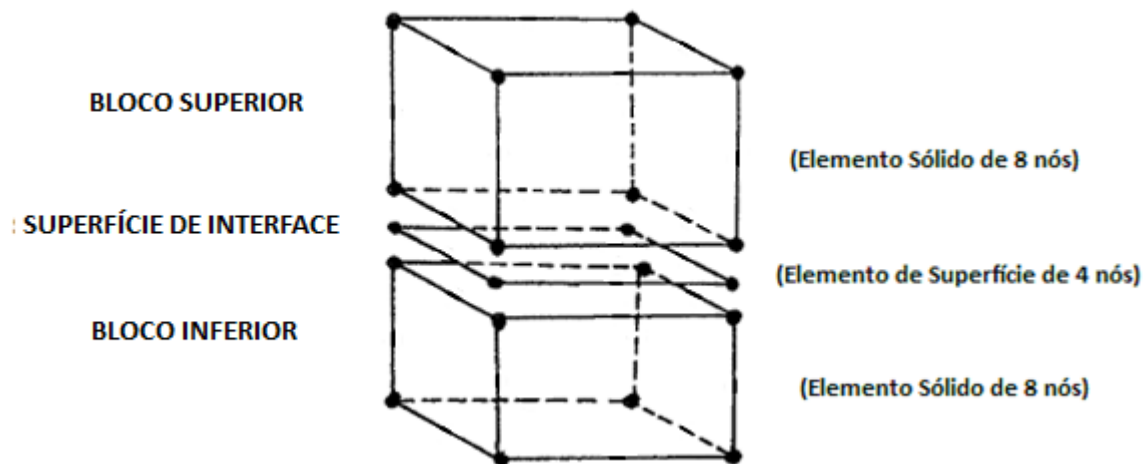


Fig. 29 - Combinação de elementos finitos sólidos de 8 nós e de elementos de superfície de 4 nós.

Considerando, por simplificação, um elemento de interface 2D de 4 nós, definido na linha média (representado a tracejado) um sistema de eixos (x'_1, x'_2), associado ao referencial local do elemento, as coordenadas dos pontos desse elemento podem ser descritas em função das coordenadas dos seus pontos nodais e considerando as funções de interpolação de coordenadas e de deslocamentos. Estas

funções são calculadas por intermédio de uma interpolação linear entre as coordenadas nodais inferiores e superiores.

As coordenadas de um ponto do elemento finito no referencial cartesiano x_m são obtidas a partir das funções interpoladoras N_i , e das coordenadas m do ponto nodal i do elemento finito e , quer na face superior quer na face inferior do elemento, $k=(Sup,Inf)$ respetivamente, ou seja,

$$(\underline{x}_m)_k = \sum_{i=1}^{4 \text{ nós}} \underline{\bar{x}}_{im}^T \cdot (N_i)_k \rightarrow \begin{cases} (\underline{x}_m)_{Sup} = \sum_{i=1}^{4 \text{ nós}} \underline{\bar{x}}_{im}^T \cdot (N_i)_{Sup} \\ (\underline{x}_m)_{Inf} = \sum_{i=1}^{4 \text{ nós}} \underline{\bar{x}}_{im}^T \cdot (N_i)_{Inf} \end{cases} \quad (5.26)$$

O sistema de eixos é referenciado, relativamente à linha média do elemento de interface 2D, tangente em x'_1 e normal em x'_2 .

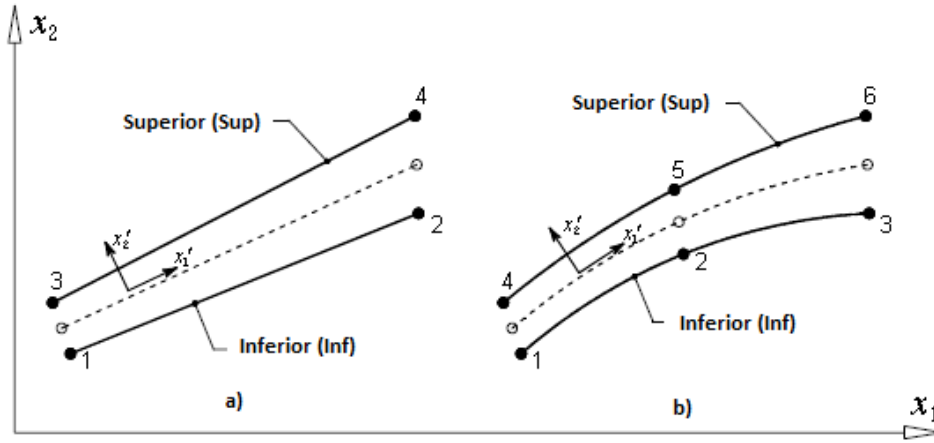


Fig. 30 - Elementos finitos de interface de linha 2D: a) linear de 4 nós b) quadrática de 6 nós

Num ponto do elemento finito 2D, segundo o sistema de coordenadas x'_m , os deslocamentos relativos da face superior e inferior do elemento $(u_k)_m = (u_{Sup}, u_{Inf})_m$ podem ser obtidos a partir dos deslocamentos dos pontos nodais na direção normal e tangencial a cada superfície de contacto $(a_{im}) = (u_{i1}, u_{i2})$ através das funções de forma N_i . Esta relação é expressa pela seguinte expressão:

$$(u'_k)_m = \sum_{i=1}^{4 \text{ nós}} N_i \cdot (a'_{im}) \rightarrow \begin{cases} (u_k)_1 = \sum_{i=1}^{4 \text{ nós}} N_i \cdot (a_{i1}) \\ (u_k)_2 = \sum_{i=1}^{4 \text{ nós}} N_i \cdot (a_{i2}) \end{cases} \quad (5.27)$$

Subdividindo a equação anterior e descrevendo individualmente, segundo o sistema de coordenadas locais, as componentes do campo dos deslocamentos e dos deslocamentos nodais do elemento finito,

$$(u'_k)_m = [u'_{Inf,1}, u'_{Inf,2}, u'_{Sup,1}, u'_{Sup,2}]^T \quad (5.28)$$

$$(a_{im}) = [a'_{11}, a'_{12}, a'_{21}, a'_{22}, a'_{31}, a'_{32}, a'_{41}, a'_{42}]^T \quad (5.29)$$

sendo que $u'_{Inf,m}$ e $u'_{Sup,m}$ correspondem ao i -ésimo componente do campo dos deslocamentos na linha inferior e superior, respetivamente, do elemento finito. E assim, pode-se reescrever a equação matricial do campo dos deslocamentos contínuos de um elemento de interface 2D de 4 nós, da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} u'_{Inf,1} \\ u'_{Inf,2} \\ u'_{Sup,1} \\ u'_{Sup,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & | & N_2 & 0 & | & 0 & 0 & | & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & | & 0 & N_2 & | & 0 & 0 & | & 0 & 0 \\ 0 & 0 & | & 0 & 0 & | & N_1 & 0 & | & N_2 & 0 \\ 0 & 0 & | & 0 & 0 & | & 0 & N_1 & | & 0 & N_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a'_{11} \\ a'_{12} \\ \hline a'_{21} \\ a'_{22} \\ \hline a'_{31} \\ a'_{32} \\ \hline a'_{41} \\ a'_{42} \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

O vetor dos deslocamentos relativos, $\Delta u'_m$, pode ser obtido através de

$$\begin{aligned} \Delta u'_m &= \begin{bmatrix} \Delta u'_1 \\ \Delta u'_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \Delta u'_{Sup,1} - \Delta u'_{Inf,1} \\ \Delta u'_{Sup,2} - \Delta u'_{Inf,2} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta u'_{Inf,1} \\ \Delta u'_{Inf,2} \\ \Delta u'_{Sup,1} \\ \Delta u'_{Sup,2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.31)$$

Ou seja, $\Delta u'_m = L \cdot (u'_k)_m$, sendo apenas caracterizado por $\Delta \underline{u}' = \underline{L} \cdot \underline{u}'$.

Como visto anteriormente, $\underline{\varepsilon} = \underline{L} \cdot \underline{u} \rightarrow \underline{\varepsilon} = \underline{L} \cdot \underline{N} \cdot \underline{a} \rightarrow \underline{\varepsilon} = \underline{B} \cdot \underline{a}$, e consequentemente,

$$\Delta \underline{u}' = \underline{L} \cdot \underline{N} \cdot \underline{a}' \rightarrow \Delta \underline{u}' = \underline{B} \cdot \underline{a}' \quad (5.32)$$

Sendo que

$$\underline{B} = \underline{L} \cdot \underline{N} \quad (5.33)$$

$$= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_1 & 0 & | & N_2 & 0 & | & 0 & 0 & | & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & | & 0 & N_2 & | & 0 & 0 & | & 0 & 0 \\ 0 & 0 & | & 0 & 0 & | & N_1 & 0 & | & N_2 & 0 \\ 0 & 0 & | & 0 & 0 & | & 0 & N_1 & | & 0 & N_2 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -N_1 & 0 & | & -N_2 & 0 & | & N_1 & 0 & | & N_2 & 0 \\ 0 & -N_1 & | & 0 & -N_2 & | & 0 & N_1 & | & 0 & N_2 \end{bmatrix}$$

Conclui-se que

$$\Delta \underline{u}' = \begin{bmatrix} -N_1 & 0 & | & -N_2 & 0 & | & N_1 & 0 & | & N_2 & 0 \\ 0 & -N_1 & | & 0 & -N_2 & | & 0 & N_1 & | & 0 & N_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a'_{11} \\ a'_{12} \\ - \\ a'_{21} \\ a'_{22} \\ - \\ a'_{31} \\ a'_{32} \\ - \\ a'_{41} \\ a'_{42} \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

O comportamento constitutivo do elemento de interface é expresso segundo a relação entre as tensões e o deslocamento relativo,

$$\begin{aligned} \underline{\sigma}'_m &= \underline{D} \cdot \Delta \underline{u}'_m \\ &= \underline{D} \cdot (\underline{B} \cdot \underline{a}') \end{aligned} \quad (5.35)$$

considerando σ segundo x'_1 e x'_2 , advém σ'_1 e σ'_2 , que representam as tensões tangenciais e normais respetivamente,

$$\underline{\sigma}'_m = \begin{bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

a matriz de elasticidade da junta, D , é representada por,

$$D = \begin{bmatrix} D_{tangencial} & 0 \\ 0 & D_{normal} \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

O deslocamento nodal do elemento no sistema de coordenadas locais pode ser obtido com base no deslocamento nodal do elemento no sistema de coordenadas global, e como tal,

$$\underline{a}' = \underline{T} \cdot \underline{a} \quad (5.38)$$

$$\text{Ou seja, } \Delta \underline{u}' = \underline{B} \cdot (\underline{T} \cdot \underline{a}) \rightarrow \underline{\sigma}' = \underline{D} \cdot \underline{B} \cdot (\underline{T} \cdot \underline{a})$$

Assim, utilizando o Princípio dos Trabalhos Virtuais, deduz-se a matriz de rigidez e o vetor de solicitação,

$$\begin{aligned} \int_S \delta (\Delta \underline{u}')^T \cdot \underline{\sigma}' \cdot dS &= \delta (\underline{a}')^T \cdot \underline{F}' \\ \int_S \delta \underline{a}^T \cdot (\underline{T}^T \cdot \underline{B}^T) \cdot (\underline{D} \cdot \underline{B} \cdot \underline{T} \cdot \underline{a}) \cdot dS &= \delta \underline{a}^T \cdot \underline{T}^T \cdot \underline{T} \cdot \underline{F} \\ \int_S \underline{T}^T \cdot \underline{B}^T \cdot \underline{D} \cdot \underline{B} \cdot \underline{T} \cdot \underline{a} \cdot dS &= \underline{F} \\ \int_S (\underline{T}^T \cdot \underline{B}^T \cdot \underline{D} \cdot \underline{B} \cdot \underline{T} \cdot dS) \cdot \underline{a} &= \underline{F} \end{aligned}$$

Por comparação entre a equação do PTV simplificada e a equação da rigidez elástica de cada elemento que é usada no método dos deslocamentos ($\underline{K} \cdot \underline{a} = \underline{F}$), ou seja,

$$\int_S (\underline{T}^T \cdot \underline{B}^T \cdot \underline{D} \cdot \underline{B} \cdot \underline{T}) \cdot dS \cdot \underline{a} = \underline{F} \leftrightarrow \int_V \underline{K} \cdot \underline{a} = \int_L \underline{F} \quad (5.39)$$

obtem-se a matriz de rigidez do elemento pela equação,

$$\underline{K} = \int_S (\underline{T}^T \cdot \underline{B}^T \cdot \underline{D} \cdot \underline{B} \cdot \underline{T}) \cdot dS \quad (5.40)$$

5.3.3. COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR DO ELEMENTO DE JUNTA

Inicialmente, quando se pretende efetuar um estudo geral da estrutura, admite-se para os blocos e para as juntas de contração um comportamento linear. Todavia, para uma análise mais detalhada, adota-se um comportamento linear elástico para os blocos da estrutura e comportamento não-linear para as interfaces entre blocos.

O comportamento não-linear apresentado pelas juntas de contração é devido à não resistência das juntas de contração à tração, bem como da possibilidade reduzida de escorregamento por corte devido ao atrito com base no critério de Coulomb.

Com base no diagrama expresso na figura seguinte, que relaciona as tensões e deslocamentos normais relativos ao elemento de junta, verifica-se que, caso a resistência à tração supere o valor idealizado, indicado na figura como Tração T, ocorre separação das duas faces da junta e como tal a sua rigidez não exerce qualquer ação.

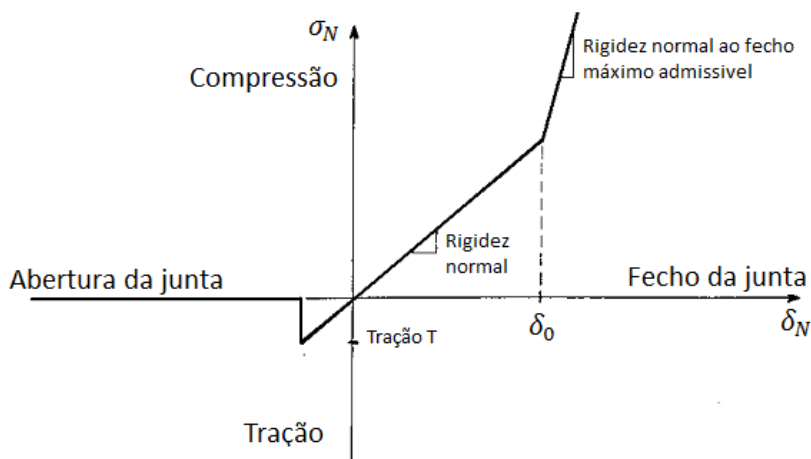


Fig. 31 - Diagrama as tensões e deslocamentos normais relativos ao elemento de junta (Genésio, M., 1993)

No diagrama seguinte, pode-se verificar a possível relação entre as tensões e deslocamentos tangenciais ocorridos no elemento de junta,

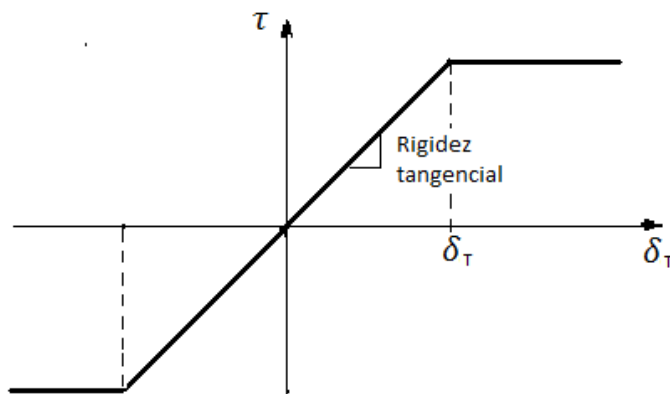


Fig. 32 - Diagrama as tensões e deslocamentos tangenciais relativos ao elemento de junta (Genésio, M., 1993)

6

MODELO DE INJEÇÃO DE JUNTAS DE CONTRAÇÃO DA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO

6.1. DESCRIÇÃO DA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO

A Barragem do Alto Lindoso é um dos maiores centros produtores de energia hidroelétrica em Portugal, que se localiza no rio Lima, a jusante da confluência com o rio Castro Laboreiro, pertencente à bacia hidrográfica de Lima (com 1525 km²), na freguesia de Lindoso, concelho de Ponte da Barca.

Projetada em 1983 pela EDP, a sua construção foi realizada pela empresa ENGIL, tendo sido terminada em 1992.

A barragem do Alto Lindoso é uma barragem de betão do tipo abóbada de dupla curvatura com arcos parabólicos e uma geometria aproximadamente simétrica, com 297 metros de comprimento no coroamento (à cota 339 metros), uma altura de 110 metros acima da fundação (granito de elevada qualidade), uma espessura na base da consola central de 21 metros, classificada como sendo uma “grande barragem” e com um volume de betão de 308,5x1000 m³.



Fig. 33 - Barragem do Alto Lindoso. Vista aérea (fonte: <http://portugalfotografiaaerea.blogspot.pt/2012/08/barragem-do-alto-lindoso.html>)

A albufeira da barragem possui uma área inundável, quando se apresenta no Nível Pleno de Armazenamento (NPA), de 1050x1000m² com uma capacidade total de armazenamento de água de 379 hm³. A albufeira da barragem do Alto Lindoso tem o Nível de Pleno Armazenamento (NPA) à cota 338 metros, o Nível de Máxima Cheia (NMC) à cota 339 metros e o Nível Mínimo de Exploração à cota 280 metros.

A central hidroelétrica é do tipo subterrânea e encontra-se instalada a sensivelmente 340 metros de profundidade, possuindo dois grupos de geradores (turbinas do tipo Francis) que possibilitam utilizar uma potência total de 630 MW. Esta potência de elevada grandeza, aliada ao facto de o aproveitamento hidroelétrico ser capaz de entrar em serviço em aproximadamente 90 segundos, permite dizer que este aproveitamento é de extrema importância e o de maior potência em Portugal.

De referir que este aproveitamento hidroelétrico (Fig. 34) é constituído ainda por dois descarregadores de cheia em túnel com capacidade de descarga de um caudal máximo de 2760 m³/s, localizados na margem direita, bem como por duas descargas de fundo através da barragem possibilitando um caudal máximo de 400 m³/s, localizadas no talvegue.

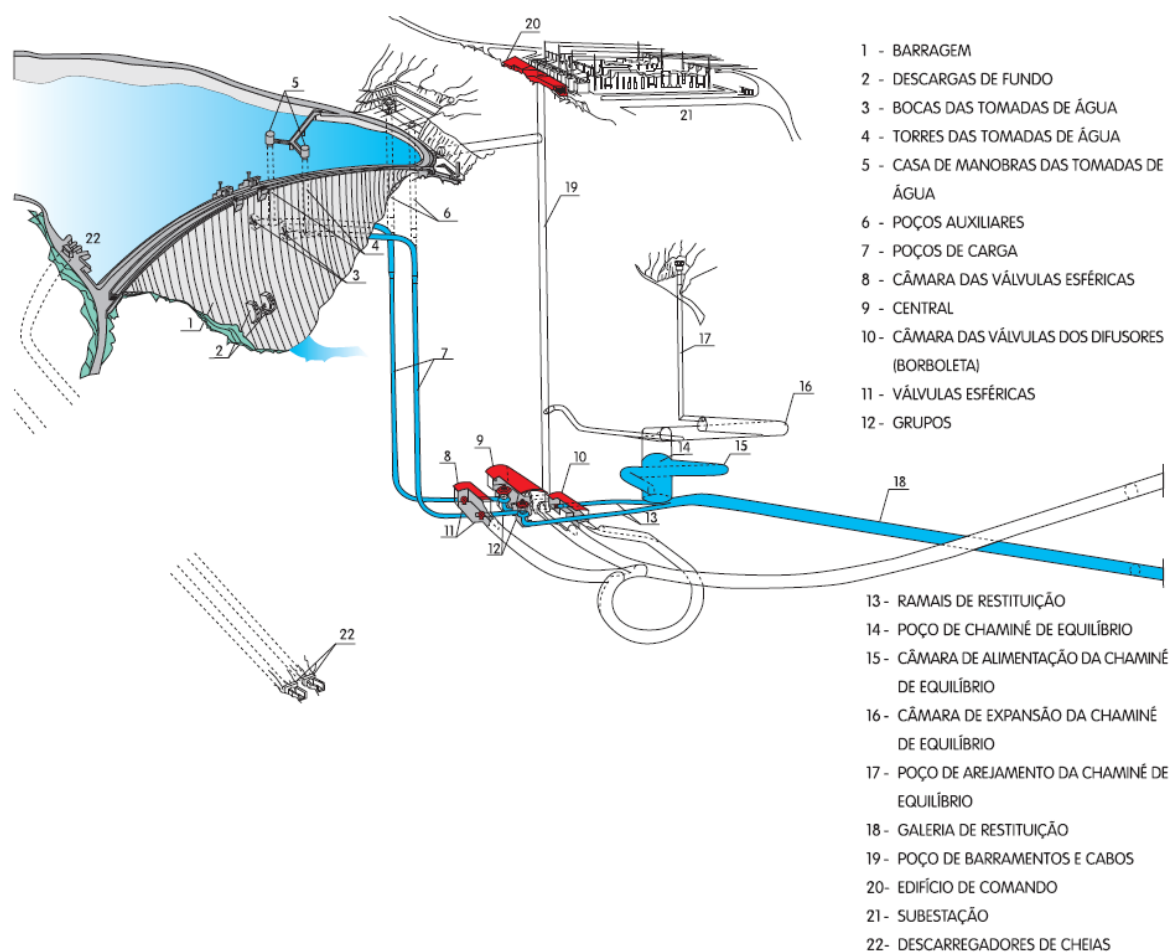


Fig. 34 - Aproveitamento hidroelétrico do Alto Lindoso (fonte: http://www.a-nossa-energia.edp.pt/pdf/desempenho_ambiental/da_18_2010_dir_prod_hid.pdf)

Seguidamente são expostas três figuras referentes à Barragem do Alto Lindoso: a planta geral (Fig. 35), a vista de montante em perfil pela diretriz do arco do coroamento (Fig. 36) e o corte vertical pelo eixo de uma das descargas de fundo (Fig. 37).

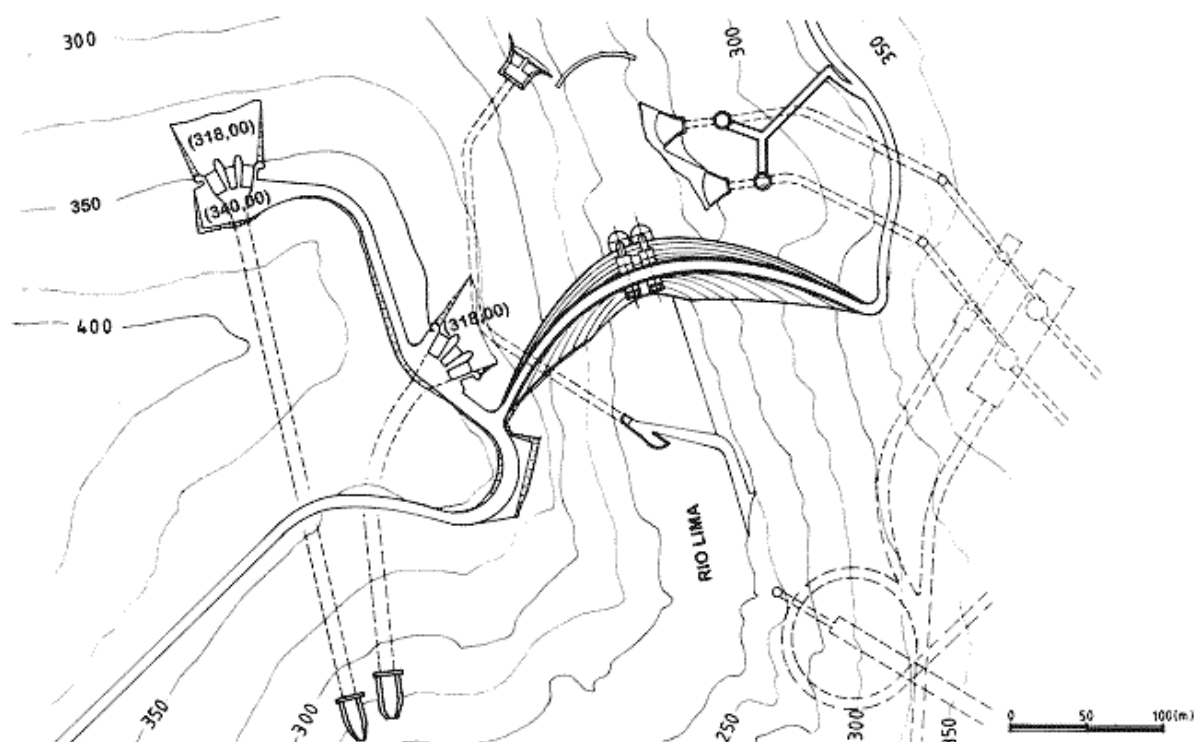


Fig. 35 - Planta da Barragem do Alto Lindoso (fonte: http://cnpqb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/AltoLindosodes.htm).

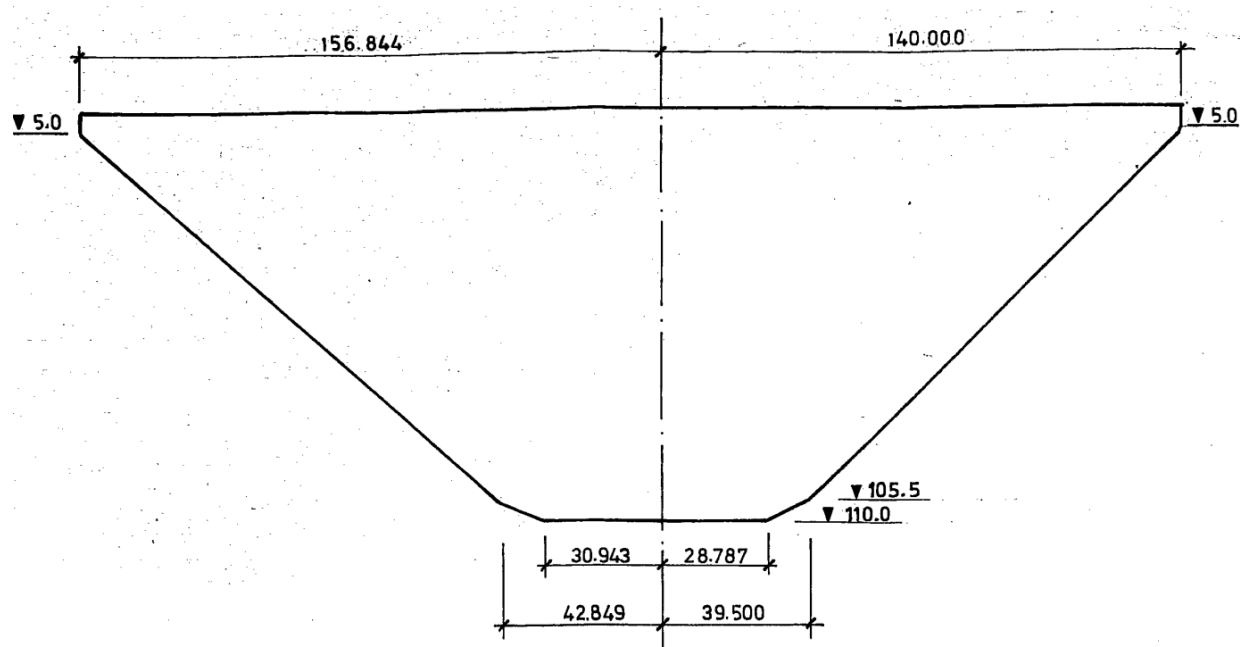


Fig. 36 - Definição em perfil da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977c).

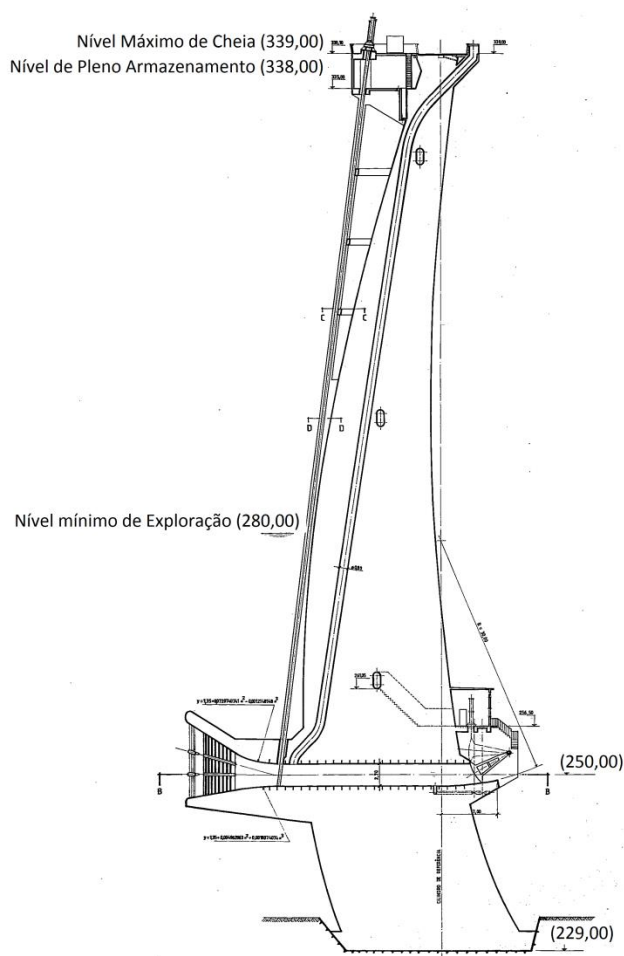


Fig. 37 - Perfil da Barragem do Alto Lindoso - Corte vertical pela consola central (EDP, 1977d).

6.2. DEFINIÇÃO GEOMÉTRICA DA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO

A Barragem do Alto Lindoso é uma barragem do tipo abóbada de dupla curvatura. Esta solução e a escolha do local mais conveniente para a sua execução deveu-se essencialmente à topografia e geologia existente, na medida em que a forma do vale e a qualidade da rocha da fundação (granito) validavam os requisitos essenciais para a execução deste tipo de barragem.

Na barragem do Alto Lindoso, a definição geométrica é efetuada com base num referencial cartesiano Oxyz, em que a origem do referencial é fixada no topo da consola de fecho. Assim, o eixo Oz é vertical e definido como positivo de forma descendente, os eixos Ox e Oy horizontais são respetivamente tangentes e normais à diretriz do arco do coroamento. Este referencial já foi exposto no capítulo dois.

Perante o referencial indicado, a forma da barragem é definida por arcos parabólicos horizontais, que são expressos através da equação do traçado da diretriz dos arcos e da equação definidora da variação da espessura dos mesmos, respetivamente $y(x, z)$ e $e(x, z)$.

Os valores das equações seguintes foram obtidos do Anteprojeto da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977c).

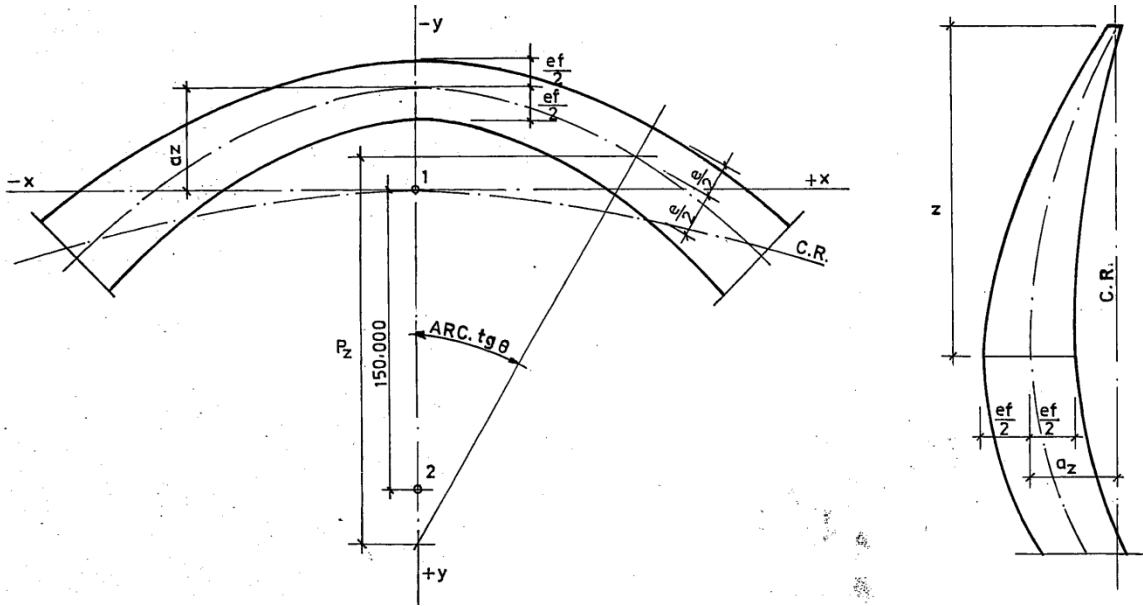


Fig. 38 - Corte horizontal à profundidade Z e corte vertical da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977c).

- Definição da diretriz dos arcos:

$$y(x, z) = \frac{x^2}{2.p(z)} - a(z) \quad (6.1)$$

Em que,

$$p(z) = 113 - 5,703572 \cdot \left(\frac{z}{10}\right) + 0,3874011 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^2 - 0,1736113 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^3 + 0,01624506 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^4 - 0,0004216277 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^5 \quad (6.2)$$

$$a(z) = 1,867834 \cdot \left(\frac{z}{10}\right) + 0,2230830 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^2 - 0,09865876 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^3 + 0,01102495 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^4 - 0,0004727742 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^5 \quad (6.3)$$

- Definição dos paramentos:

$$e(x, z) = e_0(z) \cdot \left[1 + A(z) \cdot \left(\frac{x}{100}\right)^2 \right] \quad (6.4)$$

Em que,

$$e_0(z) = 4 + 2,081566 \left(\frac{z}{10}\right) - 0,2679505 \left(\frac{z}{10}\right)^2 + 0,08034516 \left(\frac{z}{10}\right)^3 - 0,009022521 \left(\frac{z}{10}\right)^4 + 0,0003209177 \left(\frac{z}{10}\right)^5 \quad (6. 5)$$

$$A(z) = 0,3573173 \left(\frac{z}{10}\right) - 0,08548716 \left(\frac{z}{10}\right)^2 + 0,008962299 \left(\frac{z}{10}\right)^3 - 0,0001278656 \left(\frac{z}{10}\right)^4 + 0,0000005023905 \left(\frac{z}{10}\right)^5 \quad (6. 6)$$

6.3. PROGRAMA ANSYS

Através do programa de cálculo estrutural ANSYS (versão 14.5), e por via do Método dos Elementos Finitos, procedeu-se à discretização e análise do modelo estrutural e do modelo de injeção de juntas de contração da Barragem do Alto Lindoso.

O programa ANSYS permite ao utilizador escolher duas maneiras de o utilizar: quer através do interface clássico do programa, quer recorrendo à linguagem do ANSYS, ou seja, linguagem APDL (Ansys Parametric Design Language). Esta linguagem APDL possui igualmente as mesmas funções que se encontram disponíveis no interface clássico do programa.

Neste trabalho, é utilizado o ANSYS – APDL, visto que, desta maneira, é possível otimizar e automatizar os modelos desenvolvidos através de parâmetros, comandos e funções que potencializam o uso desta linguagem de programação.

De entre outras vantagens, este programa possibilita a utilização de elementos de contato entre materiais, permite efectuar a análise do referido modelo em regime de não linearidade, tanto física como geométrica, com elementos do tipo tridimensional.

A análise estrutural por elementos finitos através de modelos tridimensionais deve obedecer a 3 etapas fulcrais ao longo deste processo, ordenando-se do seguinte modo: Pré-processamento, Processamento e Pós-processamento. A fase de Pré-processamento tem como objetivo a criação do modelo de análise e a geração da malha da estrutura. Seguidamente, a fase de Processamento é relativa à definição das propriedades dos materiais, dos elementos constituintes, das cargas atuantes, entre outras etapas, com o objetivo de se proceder ao cálculo da estrutura. Finalmente, a fase de Pós-processamento permite analisar e visualizar os resultados obtidos no cálculo da estrutura, através de diagramas de tensão e deformação, listar os deslocamentos e tensões, entre outros tipos de análises.

6.3.1. MODELOS DE TESTE PRECEDENTES AO MODELO DA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO

Na fase precedente ao desenvolvimento do modelo da Barragem do Alto Lindoso, foram efetuados dois modelos com o objetivo de verificar e dominar as potencialidades do programa.

O primeiro modelo (Fig. 39 - 1) é composto por um conjunto de dez blocos em fila e o segundo (Fig. 39 - 2) é por um conjunto de seis blocos em forma de arco. Em ambos os modelos aplicavam-se forças distribuídas (com sentido de abertura da junta) nas faces dos elementos normais ao desenvolvimento da estrutura, simulando desta forma a injeção.

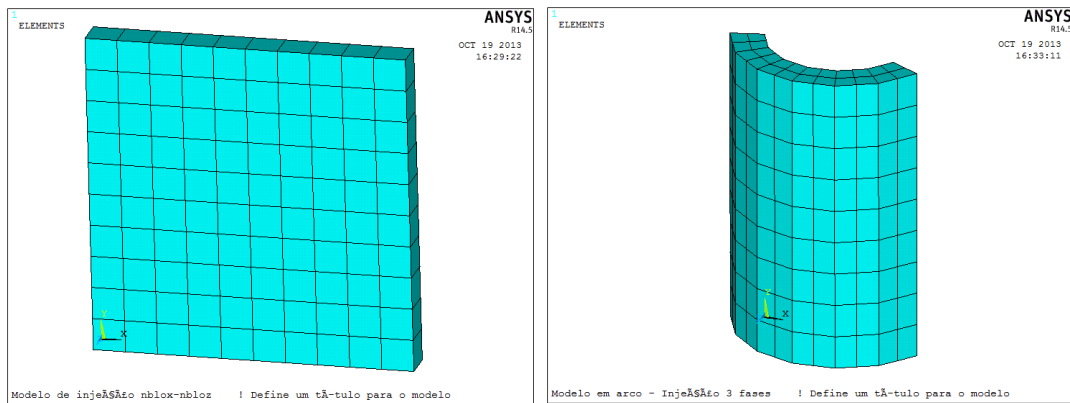


Fig. 39 - Modelo de teste obtido pelo ANSYS - composto por um conjunto de: 1) 10 blocos em fila; 2) 6 blocos em forma de arco.

6.4. DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS NO PROGRAMA ANSYS

Para se proceder à modelação e análise do comportamento da Barragem do Alto Lindoso, através do programa ANSYS, foi necessário escolher os tipos de elementos finitos que seriam mais adequados e melhor reproduziriam no modelo estrutural da barragem, consoante as suas características e propriedades. Como tal, foram utilizados dois tipos de elementos finitos: elementos sólidos tridimensionais e elementos de contacto (elementos de junta).

Os elementos finitos sólidos tridimensionais, isoparamétricos, foram utilizados quer na discretização do corpo da barragem quer no maciço de fundação.

Foram usados, inicialmente, elementos finitos volumétricos, hexaédricos, de 8 nós (elementos do tipo SOLID185 do programa ANSYS) com 3 graus de liberdade por nó e, posteriormente, elementos de 20 nós (SOLID186), que possibilitam a decomposição dos elementos em formas prismáticas.

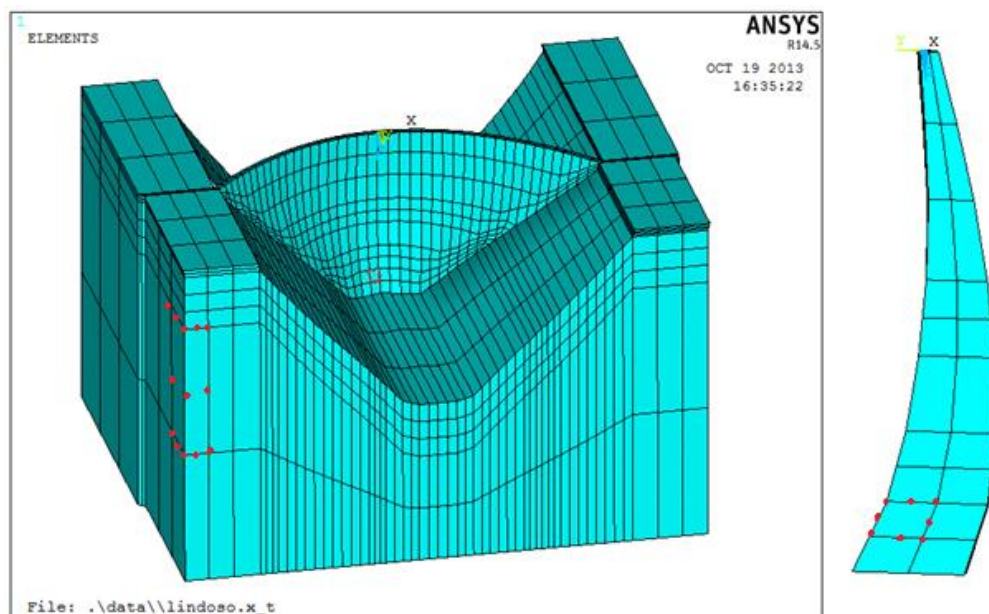


Fig. 40 - Discretização em elementos finitos tridimensionais hexaédricos da interação barragem-fundação e do corte vertical da consola central da Barragem do Alto Lindoso.

Como se verifica no modelo da figura anterior (Fig. 40), foram considerados dois elementos finitos à espessura da barragem para a malha de elementos hexaédricos. Os nós da malha da fundação nos seus planos extremos, ou seja, nos planos extremos em cada margem, no bordo de jusante e de montante, e no bordo inferior da fundação têm os deslocamentos impedidos segundo as direções x , y e z .

Relativamente aos elementos de contacto foram utilizados os elementos CONTA174 e TARGE170.

6.4.1. ELEMENTOS SÓLIDOS TRIDIMENSIONAIS

6.4.1.1 Elemento SOLID185

O elemento SOLID185 (Fig. 41) é um elemento estrutural sólido ortotrópico e tridimensional. Este elemento hexaédrico é composto por 8 nós (nos vértices), sendo que cada nó apresenta 3 graus de liberdade, ou seja, translações na direção do eixo Ox , Oy e Oz .

O referido elemento apresenta propriedades que permite simular comportamentos plásticos, e devidos à fluência, expansão, grandes deformações do material.

A figura 41, facilita a interpretação da geometria do elemento, a localização dos seus nós, bem como referencia o sistema de coordenadas do elemento.

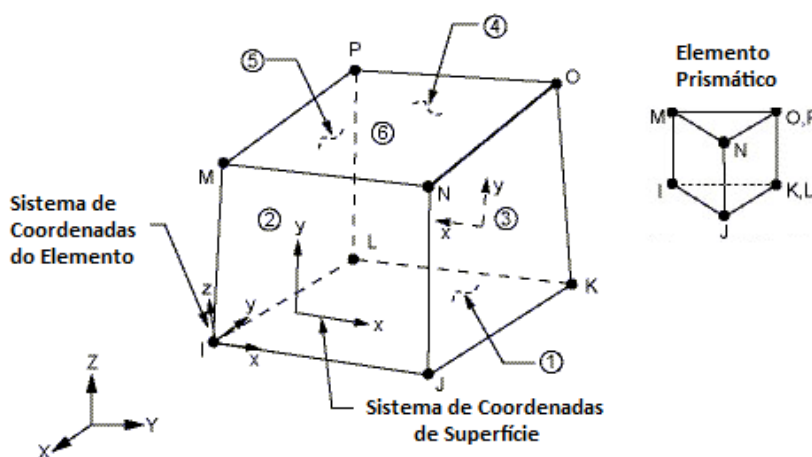


Fig. 41 - Elemento Finito de 8 nós – SOLID185 (ANSYS 14.5).

6.4.1.2 Elemento SOLID186

O elemento SOLID186 é uma versão de ordem superior do elemento sólido tridimensional de 8 nós (SOLID185). Este elemento é composto por 20 nós (nos vértices e a meio das arestas), sendo que cada nó apresenta 3 graus de liberdade, ou seja, translações na direção do eixo Ox , Oy e Oz , tendo a possibilidade de estar disposto em qualquer orientação espacial.

Este elemento é adequado para modelos que apresentem uma malha irregular e/ou com limites curvos, tendo a possibilidade de adaptar a sua forma a elementos tetraédricos, prismáticos e em pirâmide.

O elemento SOLID 186, apresenta as mesmas características do elemento SOLID185.

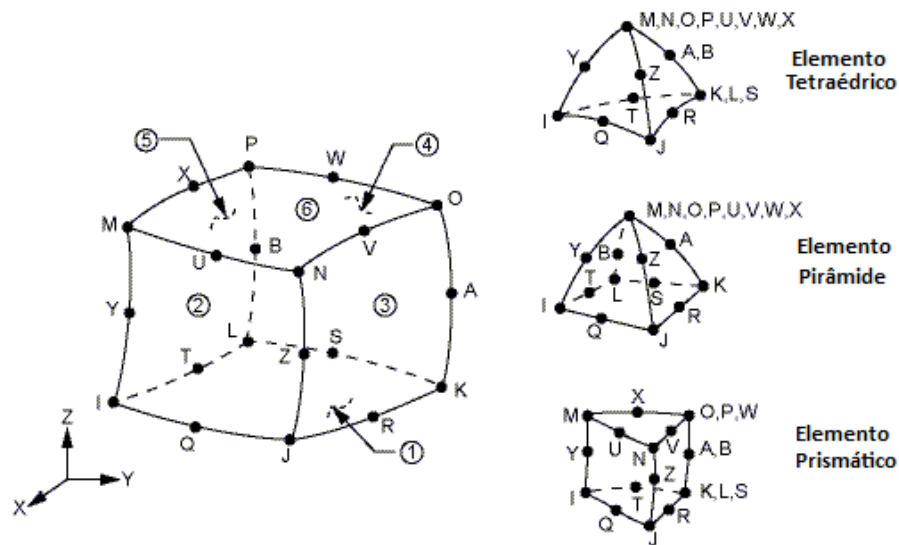


Fig. 42 - Elemento Finito de 20 nós – SOLID186 (ANSYS 14.5).

6.4.2. ELEMENTOS DE CONTACTO

Os elementos de contacto TARGE 170 e CONTA 174 são elementos estruturais de 4 ou 8 nós, que apresentam em cada nó 3 graus de liberdade com translações na direção do eixo Ox, Oy e Oz.

Estes dois elementos, definidos como superfície alvo e superfície de contacto respetivamente, atuam em conjunto, definindo um par de contacto do tipo superfície-superfície. Independentemente do tipo de material, a superfície alvo é mais rígida que a superfície de contacto.

O elemento CONTA174 é utilizado para representar o contacto e o deslizamento entre as superfícies “alvo” tridimensionais (elemento TARGE170) e uma superfície deformável definida por este elemento. Este elemento tem as mesmas características geométricas que a face do elemento sólido.

De salientar que a ordem dos nós dos elementos de contacto segue a “regra da mão direita”.

Seguidamente são expostas duas figuras que definem a geometria dos elementos de contacto TARGE 170 e CONTA 174.

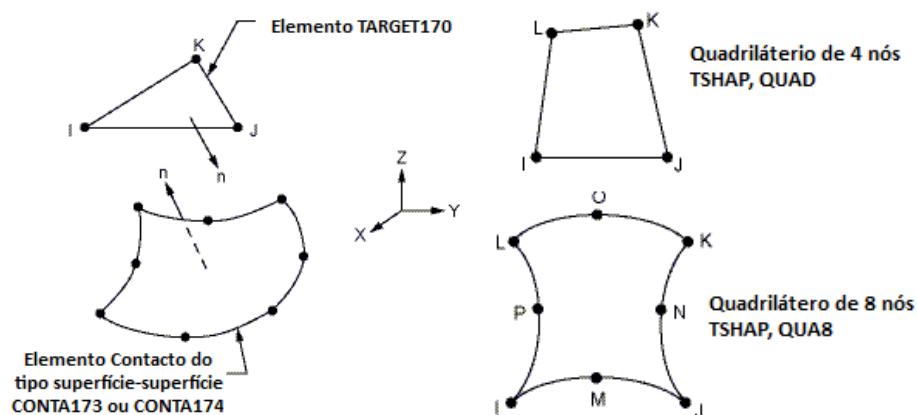


Fig. 43 - Geometria dos elementos TARGE170 e CONTA174 (ANSYS 14.5).

O ANSYS define estes elementos para simular a existência de atrito e coesão entre estes pares de contacto, bem como permite definir, entre os elementos, uma pressão, quando existe contacto e uma separação quando não existe contacto. Assim, os elementos de contacto atuam quando a superfície do elemento penetra na superfície alvo.

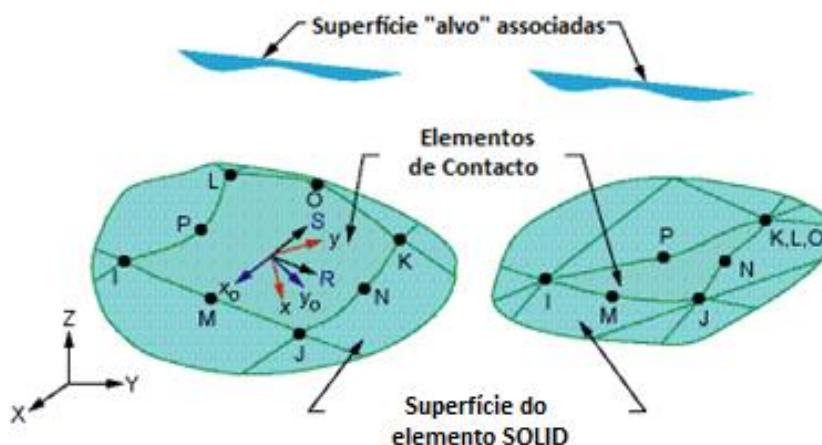


Fig. 44 – Superfície do elemento e superfície “alvo” (ANSYS 14.5).

6.5. MODELO ESTRUTURAL DA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO

6.5.1. CARATERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO BETÃO E DO MACIÇO DE FUNDAÇÃO

O betão referente ao modelo da Barragem do Alto Lindoso foi idealizado como um meio contínuo, homogéneo e isotrópico, que apresenta um comportamento elástico linear.

Para o betão utilizado na barragem, adotaram-se os seguintes valores para as suas propriedades:

- | | |
|---|--|
| • Peso específico | $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$ |
| • Módulo de elasticidade | $E = 33 \text{ GPa}$ |
| • Coeficiente de Poisson | $\nu = 0,20$ |
| • Densidade | $\rho = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m}^3$ |
| • Coeficiente de dilatação térmica linear | $\alpha = 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ |
| • Coeficiente de atrito para betão-betão | $\mu=0,8 \text{ } (\phi \approx 40^\circ)$ |

Para o maciço de fundação, adotaram-se os seguintes valores para as suas propriedades:

- | | |
|---|--|
| • Módulo de elasticidade | $E = 15/30/40 \text{ GPa}$ |
| • Coeficiente de Poisson | $\nu = 0,20$ |
| • Densidade | $\rho = 0 \text{ Kg/m}^3$ |
| • Coeficiente de dilatação térmica linear | $\alpha = 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ |

No artigo publicado pelo LNEC, “Análise do comportamento estrutural de uma barragem abóbada durante o primeiro enchimento da albufeira”, são referidos os módulos de elasticidade do betão e do maciço de fundação da Barragem do Alto Lindoso. Assim, para a barragem é utilizado 33GPa, e para o maciço de fundação são utilizados diferentes valores para o módulo de elasticidade, como se indica na figura 45 (Batista, A., et al., 1995).

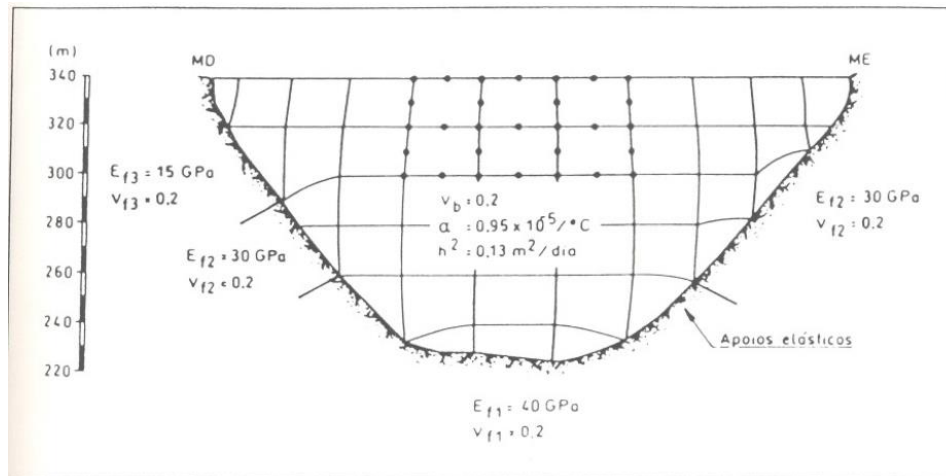


Fig. 45 – Definição das propriedades do betão da barragem e do maciço de fundação (Batista, A., et al., 1995).

Para facilitar a modelação e todo o processo de cálculo posterior de forma automatizada, foi definido para cada bloco da barragem e para cada camada do maciço de fundação, um material diferente. Todavia, todos os materiais correspondentes aos blocos da barragem apresentam as mesmas propriedades do betão. Relativamente ao maciço de fundação, definiram-se, conforme especificado na figura 45, diferentes módulos de elasticidade dependendo da zona do maciço de fundação. Assim, foi atribuído o módulo de elasticidade, para a fundação sob os sete blocos centrais, de 40GPa, para a fundação adjacente aos três blocos mais próximos da margem direita, de 15GPa, e para a fundação adjacente aos restantes blocos da barragem, de 30GPa.

Os diferentes materiais referidos anteriormente, estão seleccionados com diferentes cores, como se pode ver na figura 46.

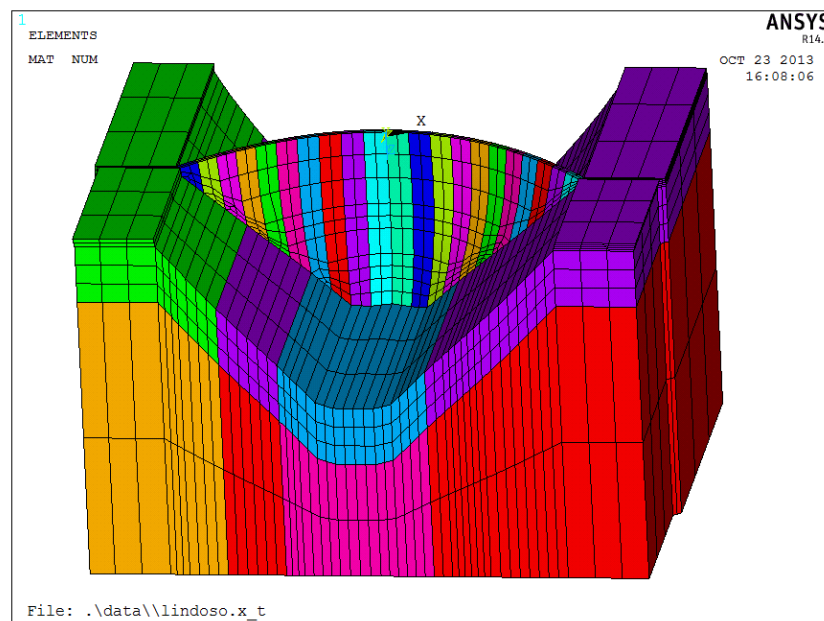


Fig. 46 – Seleção por cores, dos materiais utilizados no modelo (ANSYS).

O perfil do vale é representado, segundo o cilindro de referência, pelas equações analíticas seguidamente expostas, quer para a margem esquerda, quer para a margem direita da barragem. A definição do perfil do vale é decomposta por 3 troços de variação linear, diferentes nas duas margens.

Considerando Z como a variável que representa a profundidade entre o coroamento da barragem e sua a fundação e D a variável que define o desenvolvimento da barragem em função do valor de Z.

- Margem esquerda:

$$0 \text{ m} \leq Z \leq 5,0 \text{ m} \rightarrow D = 156,844 \text{ m} \quad (6.7)$$

$$5,0 \text{ m} \leq Z \leq 105,5 \text{ m} \rightarrow D = 162,5114 - 1,134277 \times Z \text{ m} \quad (6.8)$$

$$105,5 \text{ m} \leq Z \leq 110,0 \text{ m} \rightarrow D = 321,977 - 2,645761 \times Z \text{ m} \quad (6.9)$$

- Margem direita:

$$0 \text{ m} \leq Z \leq 5,0 \text{ m} \rightarrow D = -140,0 \text{ m} \quad (6.10)$$

$$5,0 \text{ m} \leq Z \leq 105,5 \text{ m} \rightarrow D = -145,0 + Z \text{ m} \quad (6.11)$$

$$105,5 \text{ m} \leq Z \leq 110,0 \text{ m} \rightarrow D = -290,665 + 2,38071 \text{ m} \quad (6.12)$$

6.5.2. MODELO DA BARRAGEM

Para se obter o modelo da Barragem do Alto Lindoso foi necessário seguir diversas etapas até se consumir o objectivo pretendido (Esquema 9). Inicialmente, foi desenvolvido através das equações analíticas e com o auxílio do Microsoft Excel 2010 (usando Visual Basic for Applications), um ficheiro AutoLISP, sendo importado posteriormente para o AutoCAD 2014 criando o modelo sólido da barragem (Fig. 47).

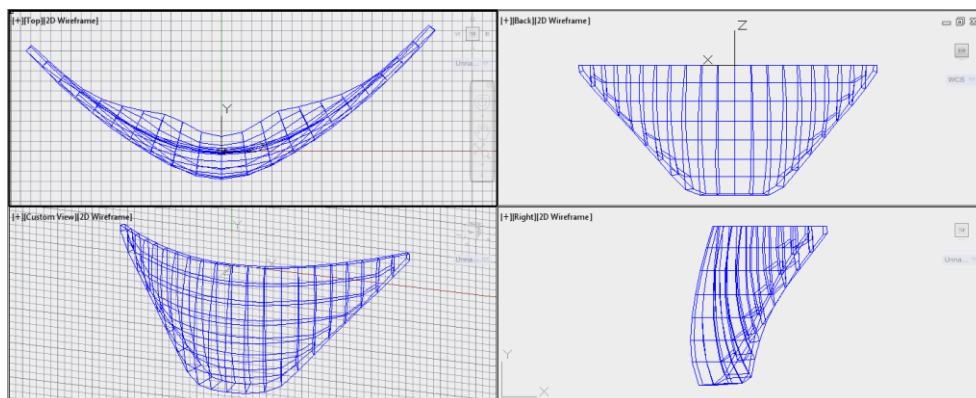


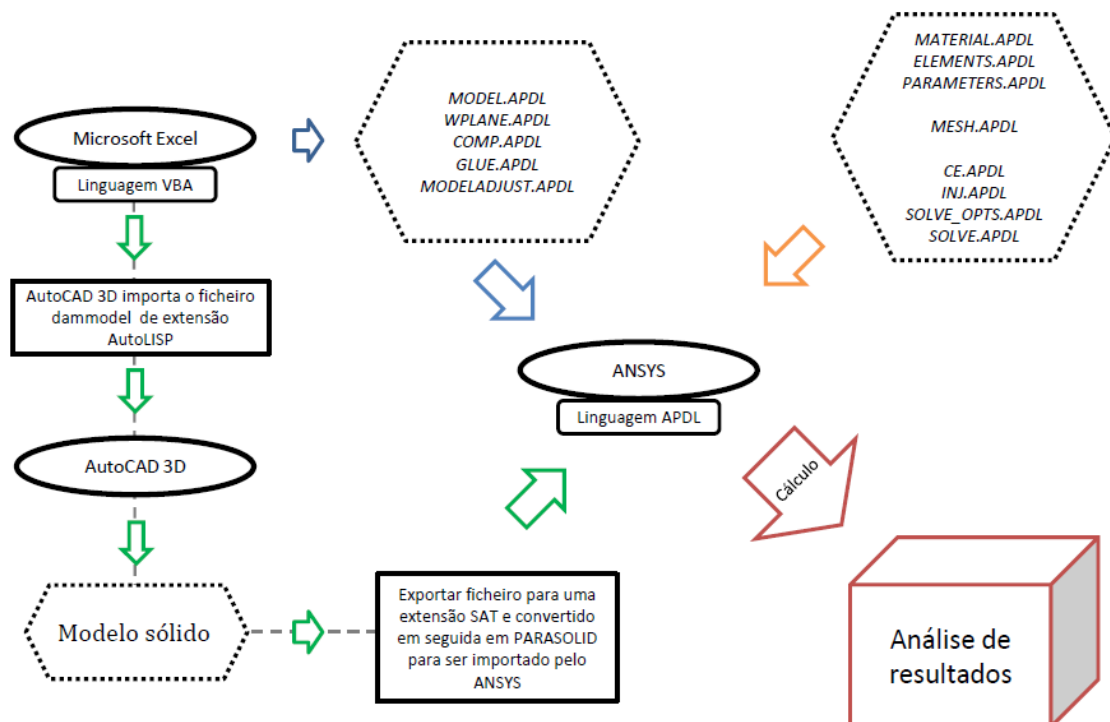
Fig. 47 - Modelo geométrico do corpo da Barragem do Alto Lindoso em AutoCAD.

Seguidamente, foi exportado o ficheiro para uma extensão SAT e convertido de seguida em PARASOLID, para ser importado pelo ANSYS. Ainda através do Microsoft Excel 2010, foram desenvolvidos os APDL's referentes à criação de todo o modelo sólido do conjunto barragem-

fundação. Paralelamente a esta metodologia, foram desenvolvidos APDL's para definir as propriedades dos materiais, os elementos constituintes, a malha quer para a barragem quer para a fundação, bem como todo o complexo e laborioso processo de cálculo referente ao peso próprio, à injeção de juntas de contração e à pressão hidrostática será abordado mais adiante.

É de salientar que esta metodologia deu continuidade a um programa em desenvolvimento na EDP, tendo como objetivo implementar, de forma automática, todo o processo desde a definição da geometria e dos parâmetros intrínsecos à barragem à metodologia de cálculo pretendida.

Foi colocado no anexo A1, uma imagem retirada do programa Microsoft Excel 2010 onde se pode compreender parte do processo de criação da geometria do modelo sólido da barragem.



Esquema 9 – Fluxograma do processo de cálculo do modelo da Barragem abóbada do Alto Lindoso.

Foram utilizados no modelo, os valores reais definidos no projeto da Barragem do Alto Lindoso. O corpo de betão da Barragem do Alto Lindoso foi representado e dividido por 21 blocos, 11 dos quais são representados do fecho da barragem em direção à margem esquerda e os restantes 10 blocos são representados do fecho da barragem em direção à margem direita. Os blocos são espaçados por juntas de contração (medido com base no cilindro de referência) com valor de 14,259 m, caso as juntas se situem desde o fecho da barragem em direção à margem esquerda e 14,000 m, se for do fecho em direção à margem esquerda da barragem.

A barragem com 110 m de altura possui 20 juntas de contração (compreendidas entre a junta 2 e junta 21, visto que a junta 1 foi definida entre o primeiro bloco da barragem e a margem da encosta) divididas em compartimentos por lâminas horizontais às cotas (321,00), (305,00), (288,00), (272,00), (256,00), (241,00), ou seja equivalentes às profundidades de 15 m, 31 m, 48 m, 64 m, 80 m, 95 m (eixo com sentido positivo descendente).

A barragem possui na sua totalidade 90 compartimentos, identificados pelo número da respetiva junta e pelo seu número de ordem na junta.

As figuras 48 e 49, referentes ao modelo geométrico do conjunto barragem-fundação, corpo da barragem e da sua consola central, respectivamente, permitem verificar os 21 blocos em que a barragem é dividida e os 7 compartimentos que a consola central possui.

Em altura, a fundação da barragem é composta por duas zonas de diferentes alturas, correspondendo a primeira a um terço e a segunda a dois terços da altura da barragem (Fig. 46). Esta divisão, permite utilizar elementos finitos de diferentes tamanhos, efectuando uma transição mais suave entre o corpo da barragem e a fundação.

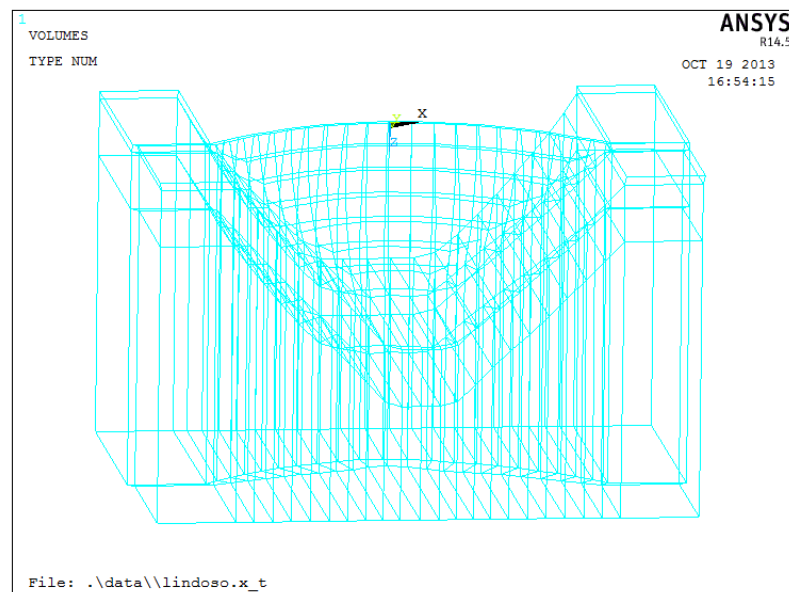


Fig. 48 - Modelo geométrico de volumes do conjunto Barragem-Fundação do Alto Lindoso em ANSYS.

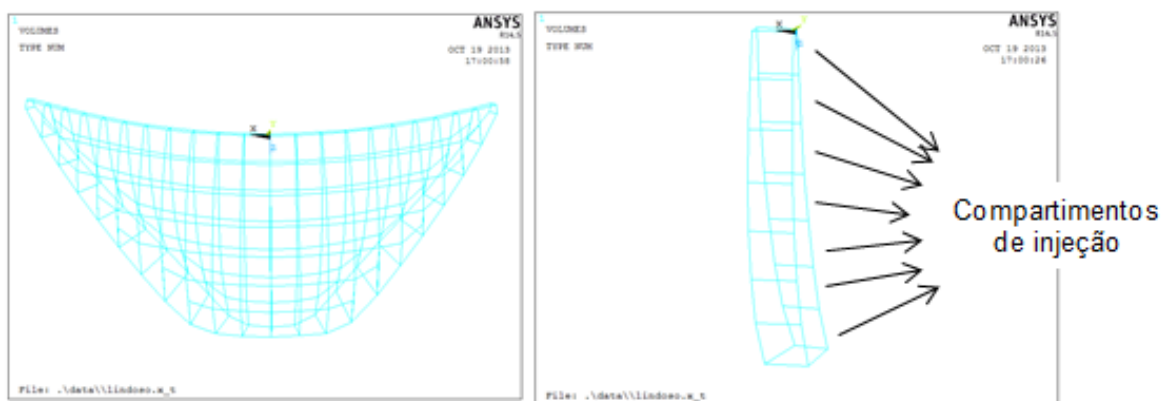


Fig. 49 - Modelo geométrico de volumes do corpo da Barragem do Alto Lindoso e a respectiva consola central em ANSYS.

A fundação da barragem foi definida por extrusões de áreas e volumes, e como tal estes volumes extrudidos não estavam ligados entre si, não apresentando um comportamento idêntico ao esperado por um corpo único. Assim, foram aplicados “couples” a todos os pares de nós da fundação com o objetivo de os unir e de formar um corpo único para o maciço de fundação.

Seguidamente foram acoplados os pares de nós referentes ao contacto entre os diversos blocos da barragem e o seu maciço de fundação.

Conforme já referido, os nós da malha da fundação nos seus planos extremos, ou seja, nos planos extremos em cada margem, no bordo de jusante e montante, e no bordo inferior do maciço de fundação têm os deslocamentos impedidos segundo as direções x, y e z.

6.5.3. DISCRETIZAÇÃO DA MALHA

Foram desenvolvidas para a Barragem do Alto Lindoso três malhas de elementos finitos, sendo a primeira malha composta por elementos hexaédricos, a segunda, por elementos tetraédricos, e a terceira é uma malha de elementos tetraédricos mais refinada.

Após se proceder à realização do cálculo do peso próprio da estrutura e da primeira estratégia de injeção das juntas, verificou-se que as três malhas apresentavam resultados muito idênticos, e como tal, foi adotada para efeitos de cálculo, ao longo do trabalho, a malha de elementos finitos hexaédricos.

A malha de elementos hexaédricos (Fig. 50 - 1) é discretizada com 2.850 elementos sólidos tridimensionais e por 16.485 nós. A malha de elementos tetraédricos (Fig. 50 - 2) é discretizada com 4.146 elementos sólidos tridimensionais e por 11.859 nós. A malha refinada de elementos tetraédricos (Fig. 50 - 3) é discretizada com 20.734 elementos sólidos tridimensionais e por 50.549 nós.

Como se pode constatar na figura 50, referente às três malhas adotadas, o modelo da barragem é discretizado em elementos finitos de diferentes dimensões, tendo-se efetuado um maior refinamento da malha de elementos no corpo da barragem de betão em comparação com o maciço de fundação, ou seja, os elementos do corpo da barragem são de menores dimensões que os elementos da fundação e desta forma representam mais eficazmente o comportamento da estrutura.

Na figura 51 são representados os arcos da barragem para as diferentes cotas que limitam os compartimentos, correspondendo a cota 0m à cota de coroamento e a cota 95m à cota superior dos compartimentos das juntas centrais, junto à fundação.

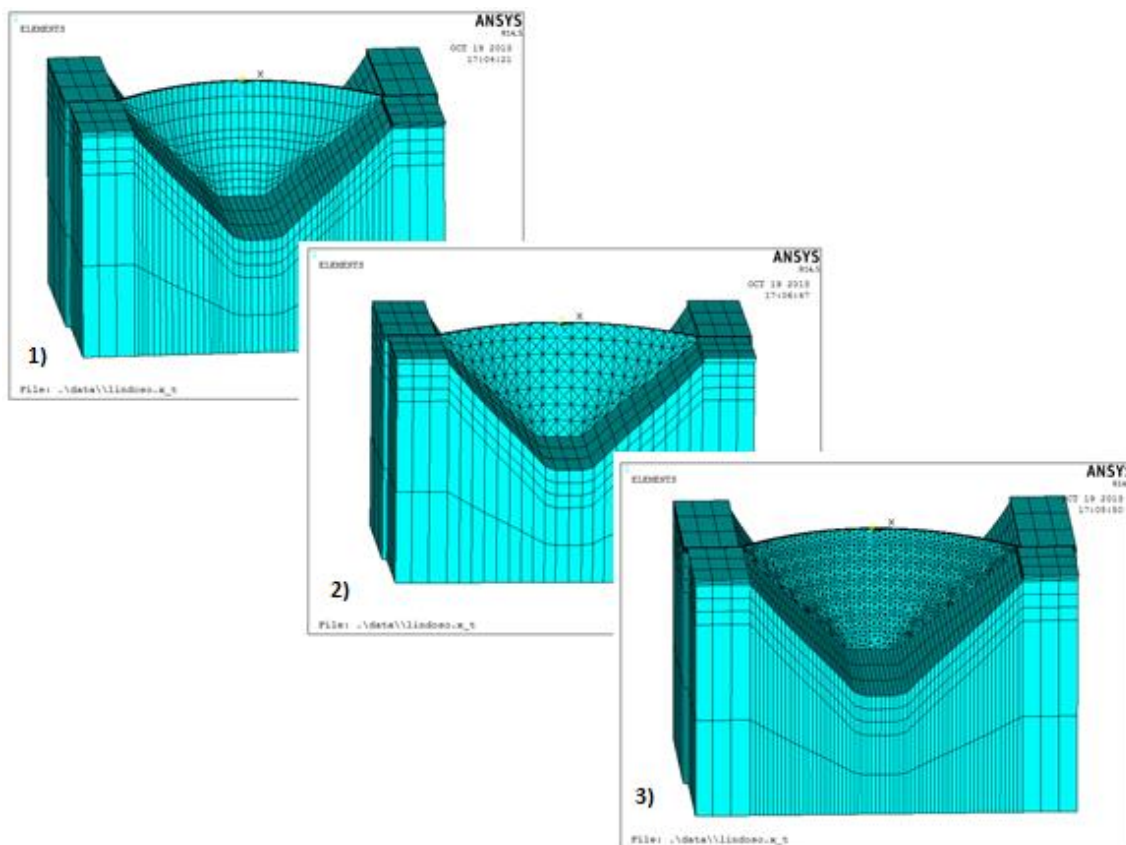


Fig. 50 - Malha: 1) de elementos hexaédricos; 2) de elementos tetraédricos; 3) refinada de elementos tetraédricos; defini no ANSYS.

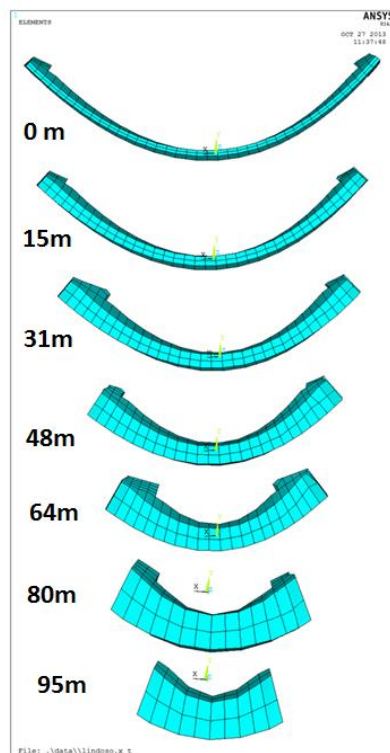


Fig. 51 – Arcos da barragem para diferentes cotas dos compartimentos.

6.6. INJEÇÃO DAS JUNTAS DE CONTRAÇÃO DA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO

De acordo com o Relatório da “Empreitada de tratamento da fundação e injeção das juntas de contração da barragem e injeções nos descarregadores de cheia do Escalão do Alto Lindoso” foi realizada previamente à injeção das juntas da barragem uma campanha de refrigeração artificial dos betões até atingir a temperatura próxima de 8,3°C.

Neste mesmo relatório estão definidas as pressões de injeção, adotadas em obra, para a injeção das juntas de contração. Todavia, foram definidas e aplicadas nas juntas do modelo da barragem, outras pressões de injeção, iguais para todas as estratégias desenvolvidas, como se poderá ver mais à frente.

A Barragem do Alto Lindoso está provida de 20 juntas de contração (ver Anexo 3), sendo estas divididas em compartimentos pelas lâminas horizontais às cotas referenciadas anteriormente.

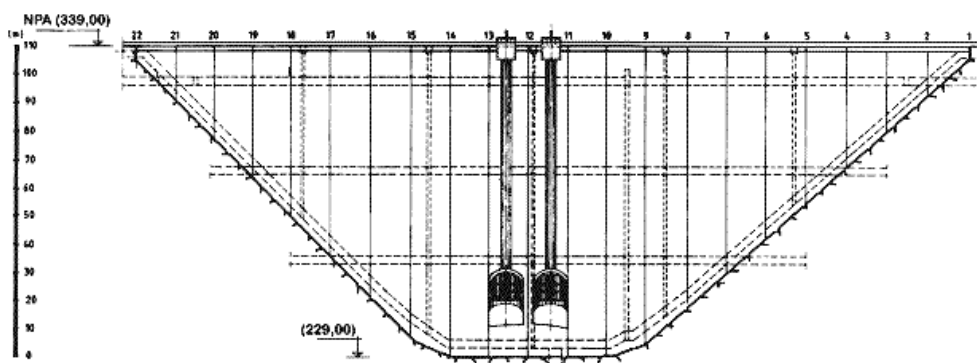


Fig. 52 - Vista de montante da Barragem do Alto Lindoso (fonte: http://cnpqg.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/AltoLindosodes.htm).

Com auxílio do programa ANSYS foram definidos, nas interfaces dos blocos da barragem (correspondentes às juntas da barragem), os elementos de contacto TARGE170 e CONTA174 como se pode verificar na Fig. 53. Para representar a injeção das juntas de contração com calda de cimento foram aplicadas diferentes pressões (com sentido de abertura da junta) nas faces dos elementos que têm contactos, simulando desta forma a injeção.

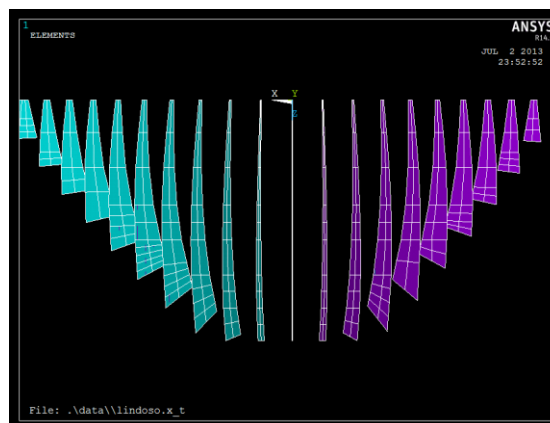


Fig. 53 - Juntas de contração da Barragem do Alto Lindoso definidas por elementos de contato, TARGE170 e CONTA174.

6.6.1. ESTRATÉGIAS DE INJEÇÃO DOS COMPARTIMENTOS

Foram simuladas cinco estratégias de injeção dos compartimentos, a saber:

- Estratégia de Injeção 1: compartimentos da barragem injetados por níveis, de margem a margem, de baixo para cima;
- Estratégia de Injeção 2: compartimentos da barragem injetados por juntas, de baixo para cima e, depois, do fecho em direção às margens;
- Estratégia de Injeção 3: compartimentos da barragem injetados por níveis, de baixo para cima e das margens em direção ao fecho da barragem;
- Estratégia de Injeção 4: compartimentos da barragem injetados em “forma de cebola”, de baixo para cima e do fecho em direção às margens;
- Estratégia de Injeção 5: compartimentos da barragem injetados por níveis, de baixo para cima e do fecho em direção às margens.

Estas estratégias estão representadas nas Tabelas 1 a 5, sendo que os números, em cada tabela, representam a ordem de injeção dos compartimentos.

- Estratégia de Injeção 1:

Z	J21	J20	J19	J18	J17	J16	J15	J14	J13	J12	J11	J10	J9	J8	J7	J6	J5	J4	J3	J2
0	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
15		53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	
31			37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52		
48					24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36			
64						13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23				
80								6	7	8	9	10	11	12						
95									1	2	3	4	5							

Tabela 1. – Estratégia de Injeção 1

- Estratégia de Injeção 2:

Z	J21	J20	J19	J18	J17	J16	J15	J14	J13	J12	J11	J10	J9	J8	J7	J6	J5	J4	J3	J2
0	47	46	44	41	38	34	29	24	18	11	4	11	18	24	29	34	38	41	43	44
15		45	43	40	37	33	28	23	17	10	3	10	17	23	28	33	37	40	42	
31			42	39	36	32	27	22	16	9	3	9	16	22	27	32	36	39		
48					35	31	26	21	15	8	2	8	15	21	26	31	35			
64						30	25	20	14	7	2	7	14	20	25	30				
80								19	13	6	1	6	13	19						
95									12	5	1	5	12							

Tabela 2. – Estratégia de Injeção 2

- Estratégia de Injeção 3:

Z	J21	J20	J19	J18	J17	J16	J15	J14	J13	J12	J11	J10	J9	J8	J7	J6	J5	J4	J3	J2
0	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39
15		30	31	32	33	34	35	36	37	38	38	37	36	35	34	33	32	31	30	
31			21	22	23	24	25	26	27	28	28	27	26	25	24	23	22	21		
48					14	15	16	17	18	19	20	19	18	17	16	15	14			
64						8	9	10	11	12	13	12	11	10	9	8				
80								4	5	6	7	6	5	4						
95									1	2	3	2	1							

Tabela 3. – Estratégia de Injeção 3

- Estratégia de Injeção 4:

Z	J21	J20	J19	J18	J17	J16	J15	J14	J13	J12	J11	J10	J9	J8	J7	J6	J5	J4	J3	J2
0	50	49	48	46	44	41	38	35	31	27	22	27	31	35	38	41	44	46	49	50
15		47	45	43	40	37	34	30	26	21	17	21	26	30	34	37	40	43	45	
31			42	39	36	33	29	25	20	16	13	16	20	25	29	33	36	39		
48					32	28	24	19	15	12	9	12	15	19	24	28	32			
64						23	18	14	11	8	6	8	11	14	18	23				
80								10	7	5	3	5	7	10						
95									4	2	1	2	4							

Tabela 4. – Estratégia de Injeção 4

- Estratégia de Injeção 5:

Z	J21	J20	J19	J18	J17	J16	J15	J14	J13	J12	J11	J10	J9	J8	J7	J6	J5	J4	J3	J2
0	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
15		39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
31			29	28	27	26	25	24	23	22	21	22	23	24	25	26	27	28		
48					20	19	18	17	16	15	14	15	16	17	18	19	20			
64						13	12	11	10	9	8	9	10	11	12	13				
80								7	6	5	4	5	6	7						
95									3	2	1	2	3							

Tabela 5. – Estratégia de Injeção 5

6.6.2. PRESSÕES DE INJEÇÃO DOS COMPARTIMENTOS

Em cada compartimento da barragem são aplicadas as pressões (valor em MPa), que constam na tabela 6, para simularem o processo de injeção.

A aplicação das pressões nos compartimentos é efetuada da seguinte maneira: no compartimento a ser injetado, é aplicado o valor da pressão da iteração correspondente e, no compartimento correspondente à iteração seguinte, é aplicado metade do valor da pressão correspondente a essa iteração, com vista a minimizar os efeitos de pressões localizadas (esta pressão simula o efeito da pressão da água introduzindo nos compartimentos vizinhos do que está a ser injetado).

Após efetuada a injeção de um determinado compartimento, à pressão especificada, no programa (definido em código APDL) são aplicadas as “constraint equations” aos seus pares de nós desse compartimento, com o objetivo de nas injeções dos restantes, a abertura da junta nesse compartimento ficar constante, ou seja, todos os pares de nós desse compartimento apresentam sempre a mesma distância.

- Pressões aplicadas nos compartimentos das juntas (sentido de abertura da junta):

Z	J21	J20	J19	J18	J17	J16	J15	J14	J13	J12	J11	J10	J9	J8	J7	J6	J5	J4	J3	J2
0	0.30	0.20	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.20	0.30
15		0.30	0.20	0.20	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.20	0.30	
31			0.30	0.30	0.20	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.20	0.30		
48				0.30	0.20	0.20	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.20	0.20	0.30			
64					0.30	0.30	0.20	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.20	0.30	0.30				
80						0.30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30							
95							0.30	0.30	0.30	0.30	0.30									

Tabela 6 - Pressões aplicadas nas faces dos elementos que têm contactos (valores em MPa)

Na tabela 7 é possível compreender o processo de aplicação da pressão nos compartimentos, dependendo da iteração em causa, ou seja, na iteração 1 da estratégia de injeção 5, é aplicada a pressão de 0,3MPa no compartimento correspondente à iteração 1 e 0,15MPa ao compartimento correspondente à iteração 2.

Z	J21	J20	J19	J18	J17	J16	J15	J14	J13	J12	J11	J10	J9	J8	J7	J6	J5	J4	J3	J2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
31			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
48				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
64					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
80						0	0	0	0	0	0	0	0							
95							0	0.15	0.3	0.15	0									

Tabela 7 – Exemplo de aplicação das pressões – iteração 1 da estratégia de injeção 5 (valores em MPa)

Assim, através deste procedimento de cálculo automático é possível aplicar de uma forma fácil e rápida diferentes pressões nos compartimentos, diferentes estratégias de injeção, injetar apenas um determinado número de compartimentos da barragem, entre outras situações.

Na figura 54 estão representadas as pressões de injeção aplicadas nas juntas do modelo da Barragem do Alto Lindoso para as três malhas definidas.

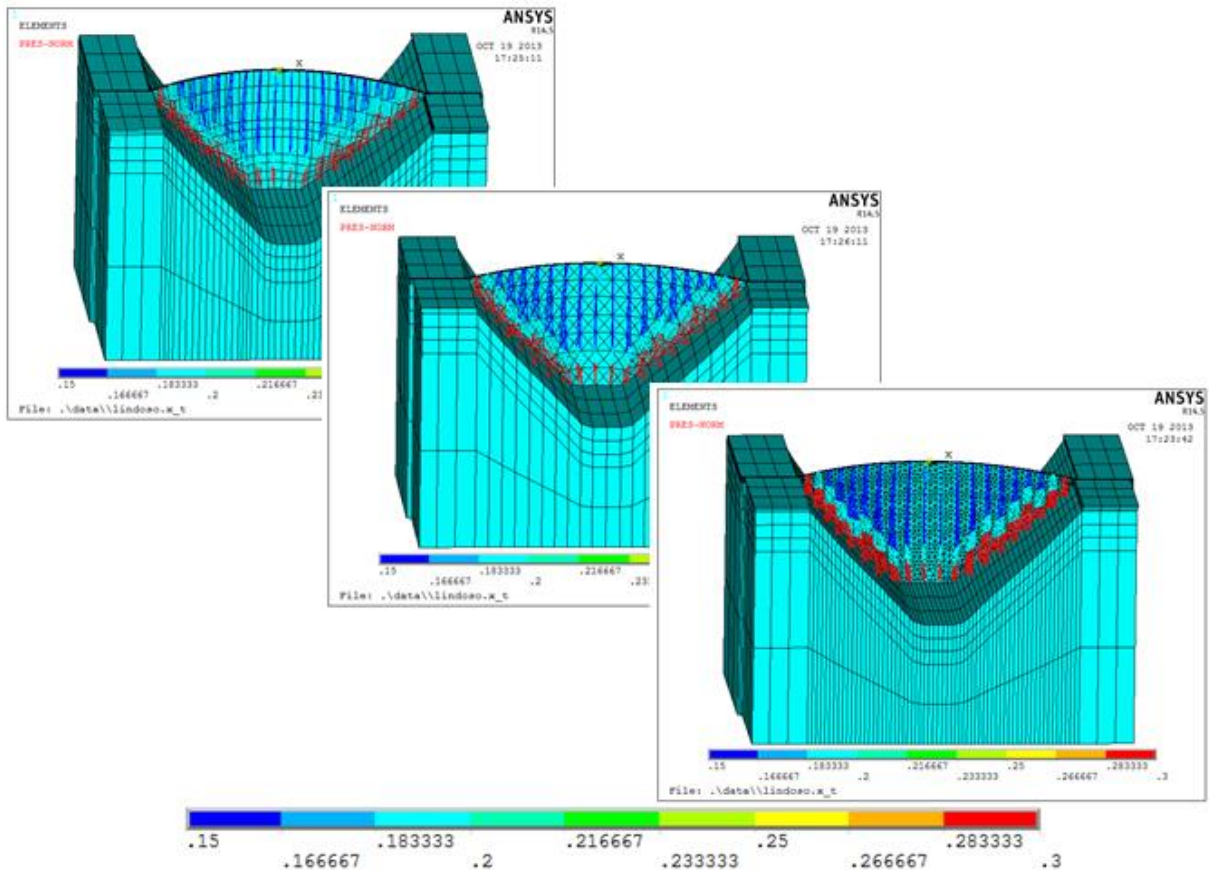


Fig. 54 - Aplicação da pressão de injeção nas três malhas definidas para o modelo da Barragem do Alto Lindoso.

6.7. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO

6.7.1. VERIFICAÇÃO DA ABERTURA DA JUNTA CENTRAL DA BARRAGEM

Após as injeções das juntas de contração estarem concluídas, é necessário proceder a algumas verificações, para se certificar que tudo está corretamente aplicado.

Como tal, pode efectuar-se um cálculo dos deslocamentos horizontais registados na junta central da barragem, e consequentemente determina-se a abertura dessa junta para diferentes cotas, como será efetuado mais adiante.

A figura 55 representa a deformada da barragem para a estratégia de injeção 1, onde se verifica a abertura das juntas de contração.

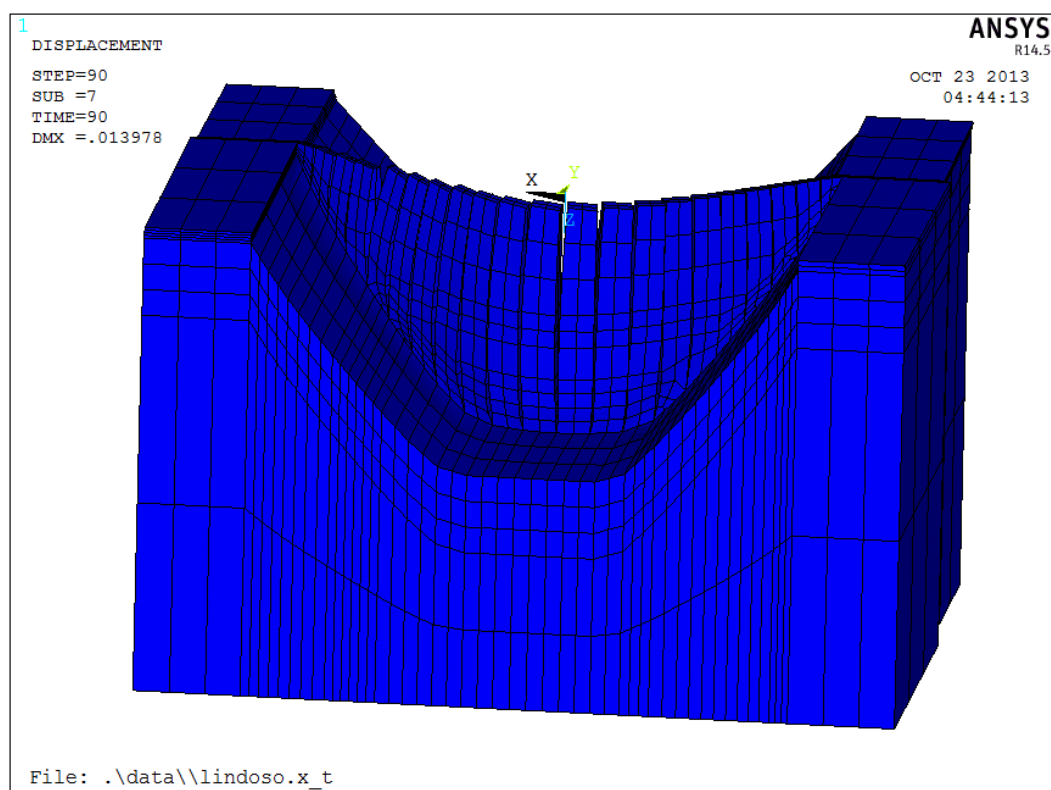


Fig. 55 – Deformada da estrutura para a estratégia de injeção 1 com uma malha de elementos hexaédricos.

6.7.2. VERIFICAÇÃO DA APLICAÇÃO DAS CE'S (CONSTRAINT EQUATIONS)

É importante verificar se as CE's estão a ser aplicadas corretamente nos nós da junta entre os blocos iblo e iblo+1 no compartimento à cota inj_z. Para tal, basta verificar se a abertura de alguns compartimentos em diferentes iterações do processo de injeção, continua a mesma. Assim, foram verificados dois compartimentos para se constatar que, à medida que vão sendo injetados os compartimentos seguintes, o compartimento em análise mantenha a sua abertura. Esta análise foi efetuada para as três malhas, todavia, os resultados expostos na tabela 8 e 9 são obtidos com a malha de elementos hexaédricos.

Os compartimentos analisados foram o 1 e o 7. Sendo que a sua abertura nas iterações 1, 2 e 3 e nas iterações 7, 8 e 9, respetivamente, mantém-se constante, como se pode ver na tabela 8 e 9.

i) Abertura do 1º compartimento injetado

iter1						
NODE	UX	UY	UZ	USUM		
Bloco 9	-3.30E-04	-2.28E-05	-7.66E-05	3.40E-04	Distância Total	0.441 mm
Bloco 10	1.07E-04	-3.10E-05	-2.42E-05	1.14E-04	Distância UX	-0.438 mm
Bloco 9	-2.97E-04	-2.22E-05	-1.02E-04	3.15E-04	Distância Total	0.378 mm
Bloco 10	7.91E-05	-2.56E-05	-6.44E-05	1.05E-04	Distância UX	-0.376 mm

iter2					
NODE	UX	UY	UZ	USUM	
Bloco 9	-3.14E-04	-3.11E-05	-8.62E-05	3.27E-04	Distância Total 0.441 mm
Bloco 10	1.24E-04	-3.93E-05	-3.37E-05	1.34E-04	Distância UX -0.438 mm
Bloco 9	-2.86E-04	-2.77E-05	-1.09E-04	3.07E-04	Distância Total 0.378 mm
20804	9.06E-05	-3.11E-05	-7.15E-05	1.20E-04	Distância UX -0.376 mm
iter3					
NODE	UX	UY	UZ	USUM	
Bloco 9	-3.04E-04	-3.30E-05	-8.75E-05	3.19E-04	Distância Total 0.441 mm
Bloco 10	1.33E-04	-4.12E-05	-3.51E-05	1.44E-04	Distância UX -0.438 mm
Bloco 9	-2.79E-04	-2.93E-05	-1.11E-04	3.02E-04	Distância Total 0.378 mm
Bloco 10	9.73E-05	-3.26E-05	-7.30E-05	1.26E-04	Distância UX -0.376 mm

Tabela 8 – Abertura do 1º compartimento injetado

ii) Abertura do 7º compartimento injetado

iter7					
NODE	UX	UY	UZ	USUM	
Bloco 9	-4.38E-04	-2.05E-04	-1.16E-04	4.97E-04	Distância Total 0.227 mm
Bloco 10	-3.11E-04	-3.63E-04	-1.38E-05	4.78E-04	Distância UX -0.127 mm
Bloco 9	-4.56E-04	-1.65E-04	-1.32E-04	5.02E-04	Distância Total 0.307 mm
Bloco 10	-2.15E-04	-2.67E-04	2.80E-05	3.44E-04	Distância UX -0.241 mm
Bloco 9	-4.52E-04	-1.09E-04	-7.56E-05	4.71E-04	Distância Total 0.441 mm
Bloco 10	-1.46E-05	-1.17E-04	-2.31E-05	1.20E-04	Distância UX -0.438 mm
iter8					
NODE	UX	UY	UZ	USUM	
Bloco 9	-4.25E-04	-2.25E-04	-1.19E-04	4.95E-04	Distância Total 0.227 mm
Bloco 10	-2.98E-04	-3.83E-04	-1.64E-05	4.85E-04	Distância UX -0.127 mm
Bloco 9	-4.46E-04	-1.80E-04	-1.37E-04	5.00E-04	Distância Total 0.307 mm
Bloco 10	-2.05E-04	-2.82E-04	2.37E-05	3.49E-04	Distância UX -0.241 mm
Bloco 9	-4.48E-04	-1.18E-04	-8.07E-05	4.70E-04	Distância Total 0.441 mm
Bloco 10	-9.66E-06	-1.27E-04	-2.82E-05	1.30E-04	Distância UX -0.438 mm

iter9

NODE	UX	UY	UZ	USUM		
Bloco 9	-4.15E-04	-2.37E-04	-1.19E-04	4.93E-04	Distância Total	0.227 mm
Bloco 10	-2.88E-04	-3.95E-04	-1.68E-05	4.89E-04	Distância UX	-0.127 mm
Bloco 9	-4.39E-04	-1.89E-04	-1.38E-04	4.98E-04	Distância Total	0.307 mm
Bloco 10	-1.98E-04	-2.91E-04	2.22E-05	3.53E-04	Distância UX	-0.241 mm
Bloco 9	-4.43E-04	-1.24E-04	-8.29E-05	4.68E-04	Distância Total	0.441 mm
Bloco 10	-5.42E-06	-1.32E-04	-3.04E-05	1.36E-04	Distância UX	-0.438 mm

Tabela 9 – Abertura do 7º compartimento injetado

6.7.3. VERIFICAÇÃO DA APLICAÇÃO DA FORÇA DE ATRITO

Para avaliar a influência que o atrito teria essencialmente no contato entre as interfaces dos blocos de betão da barragem, foram realizados todos os cálculos propostos anteriormente, para valores do seu coeficiente iguais a 0.0, 0.8 e 2.0. Os valores do coeficiente de atrito 0.0 e 2.0, foram utilizados simplesmente para avaliar a influência deste coeficiente no contacto entre juntas, visto que estes valores não são plausíveis para um contacto betão-betão.

Assim com base nos resultados obtidos na figura 56, respeitantes à estratégia de injeção 1:

Coeficiente de atrito	Deslocamento radial máximo (orientação negativa para montante)
0,0	- 8,51 mm
0,8	- 8,29 mm
2,0	- 8,26 mm

Tabela 10 – Deslocamentos radiais máximos dependentes do coeficiente de atrito adotado para a estratégia de injeção 1.

conclui-se que o coeficiente de atrito não tem grande efeito nos resultados finais da simulação do processo de injeção onde estão envolvidos, preponderantemente, movimentos de abertura/fecho das juntas. Foi utilizado o valor de 0.8 para o coeficiente de atrito entre betão-betão, como já foi referenciado anteriormente, no subcapítulo de caracterização das propriedades do betão e do maciço de fundação.

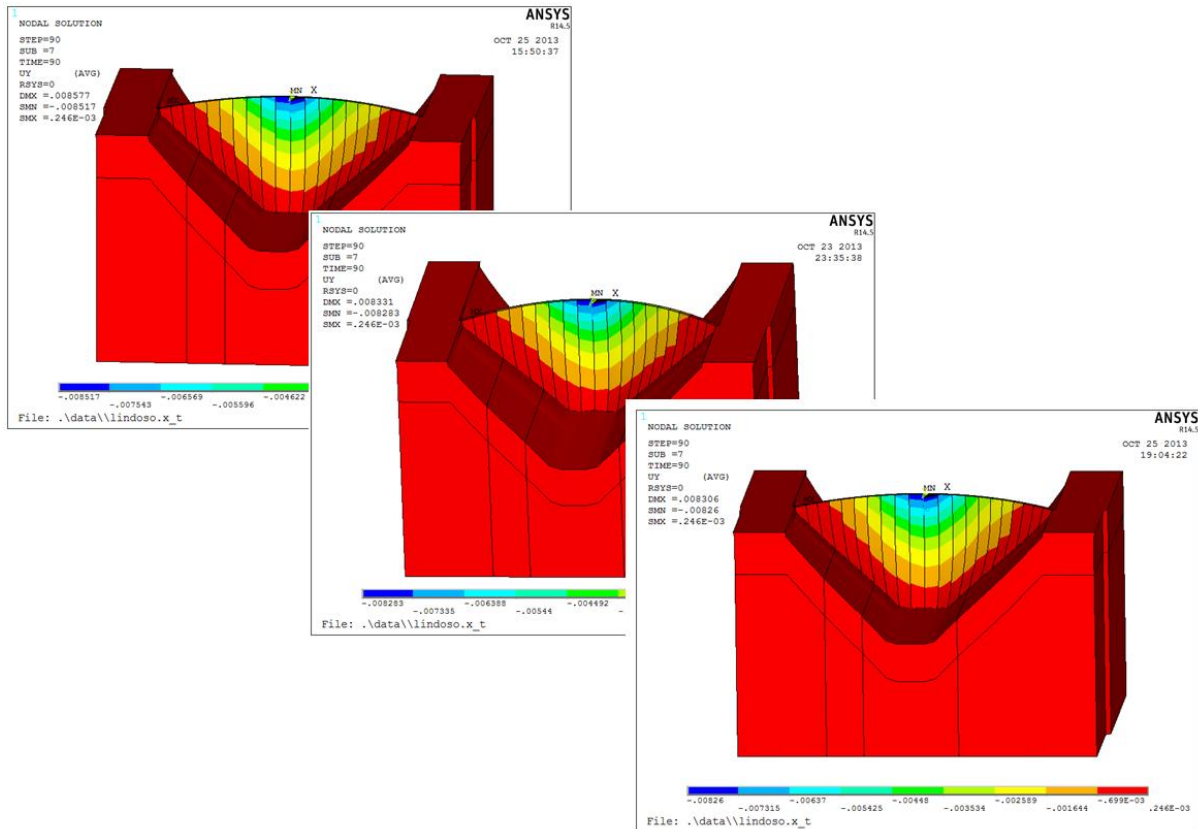


Fig. 56 – Deslocamentos obtidos na malha de elementos hexaédricos na estratégia de injeção 1 para os coeficientes de atrito iguais a 0.0, 0.8, e 2.0, respetivamente.

6.8. EFEITO DA PRESSÃO HIDROSTÁTICA

Foi realizado um estudo da ação da pressão hidrostática na Barragem do Alto Lindoso, tendo-se considerado cotas para diferentes níveis de enchimento da albufeira, (226,00), (242,50), (261,00), (277,00), (309,00), (325,00), (331,00), (335,00), (336,00), ou seja equivalentes às alturas de água de 0 m, 16.5 m, 35 m, 51 m (NmE), 67 m, 83 m, 99 m, 105 m, 109 m (NPA), 110 m (NMC), respetivamente.

As cotas de água adotadas, possibilitaram a comparação dos resultados com os obtidos num modelo idêntico da Barragem do Alto Lindoso desenvolvido pela EDP para estas mesmas cotas.

Considerou-se 10 kN/m^3 para o peso específico da água. Na figura 57 pode verificar-se a aplicação da pressão hidrostática no modelo da Barragem do Alto Lindoso.

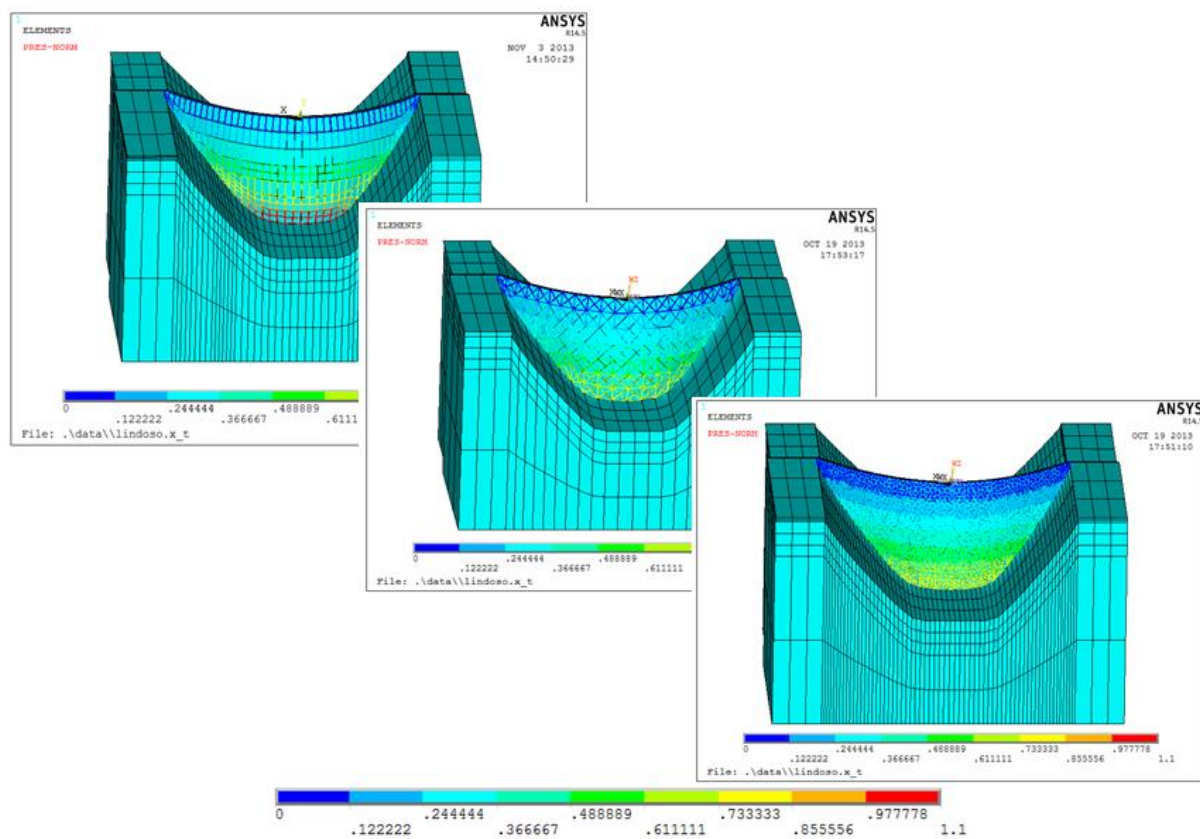


Fig. 57 - Aplicação da pressão hidrostática nos modelos da Barragem do Alto Lindoso.

7

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO MODELO DA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO

7.1. CONSIDERAÇÕES INTRODUTÓRIAS

Neste capítulo são analisados os resultados, obtidos no modelo de cálculo para a malha de elementos finitos hexaédricos (malha nº1 da figura 50), quer para ações isoladas, como é o caso da:

- ação do peso próprio (PP);
- injeção das juntas de contração (PI);
- ação da pressão hidrostática (PH);

quer para as seguintes combinações de ações:

- combinação 1: PP (com juntas abertas) + PI;
- combinação 2: PP (com juntas abertas) + PI + PH;
- combinação 3: PP (com juntas fechadas) + PH.

Relativamente à injeção das juntas de contração, é de salientar que foram simuladas as cinco estratégias de injeção para as três malhas de elementos finitos propostas. Todavia, dado que os resultados foram muito semelhantes, optou-se por analisar os resultados obtidos pela malha de elementos hexaédricos. As estratégias são analisadas na sua globalidade, relativamente aos deslocamentos radiais, às tensões principais máximas e mínimas, e às tensões horizontais na direção dos arcos, verificando a ocorrência do efeito de arco. É analisado, com maior pormenor, a junta central da barragem, com o objetivo de avaliar os dados acima referidos e a abertura da junta para as diferentes estratégias. É importante referir que, a análise da junta central, não reflecte o comportamento das outras juntas de contração da barragem, sendo apenas uma junta em estudo.

Seguidamente será escolhida a estratégia que apresente melhores resultados, e como tal será utilizada aquando da realização das combinações de ações mencionadas.

A ação da pressão hidrostática na barragem é analisada com maior ênfase para três níveis de enchimento da albufera:

- albufera em NmE (51 m);
- albufera em NPA (109 m);
- albufera em NMC (110 m).

É efetuada posteriormente a curva de influência dos deslocamentos radiais obtidos no topo da junta central da barragem para os diferentes níveis de enchimento da albufeira (referenciados no capítulo 6.8). Por fim, são realizadas e analisadas as três combinações de ações propostas anteriormente.

Neste modelo, foi adotado como sinal positivo, os deslocamentos radiais em direção a jusante.

Os resultados referentes às tensões horizontais são apresentados no paramento de jusante da barragem, (ligeiramente inclinado para montante, sendo possível visualizar e analisar a superfície de contacto com a fundação) e na consola central. No caso dos resultados relativos às tensões principais, máximas e mínimas, são apresentados no paramento de jusante (ligeiramente inclinado para montante) e no paramento de montante da barragem.

7.2. PESO PRÓPRIO

A ação do peso próprio pode ser considerada, como anteriormente explicado, através de dois métodos de análise:

- simulando faseadamente o processo construtivo relativo à betonagem das sucessivas camadas que compõe os blocos da barragem
- simulando que o peso próprio seria aplicado na barragem já construída e monolitizada, de forma “instantânea”.

Neste trabalho a ação do peso próprio foi considerada com juntas abertas, apresentando os blocos da barragem um funcionamento isostático.

7.2.1. COM JUNTAS ABERTAS

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados da ação do peso próprio com juntas abertas.

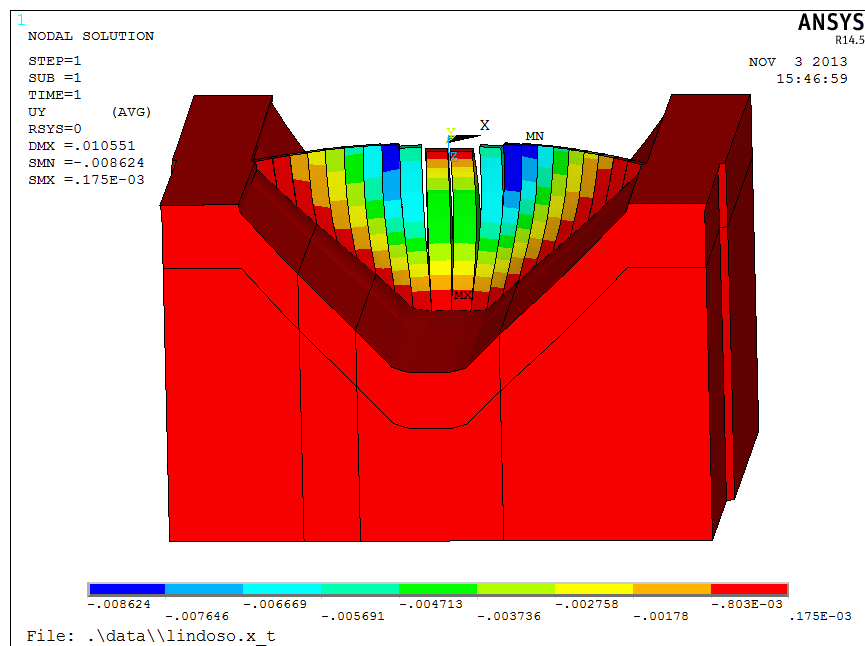


Fig. 58 – Deslocamento radial devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas abertas (m)

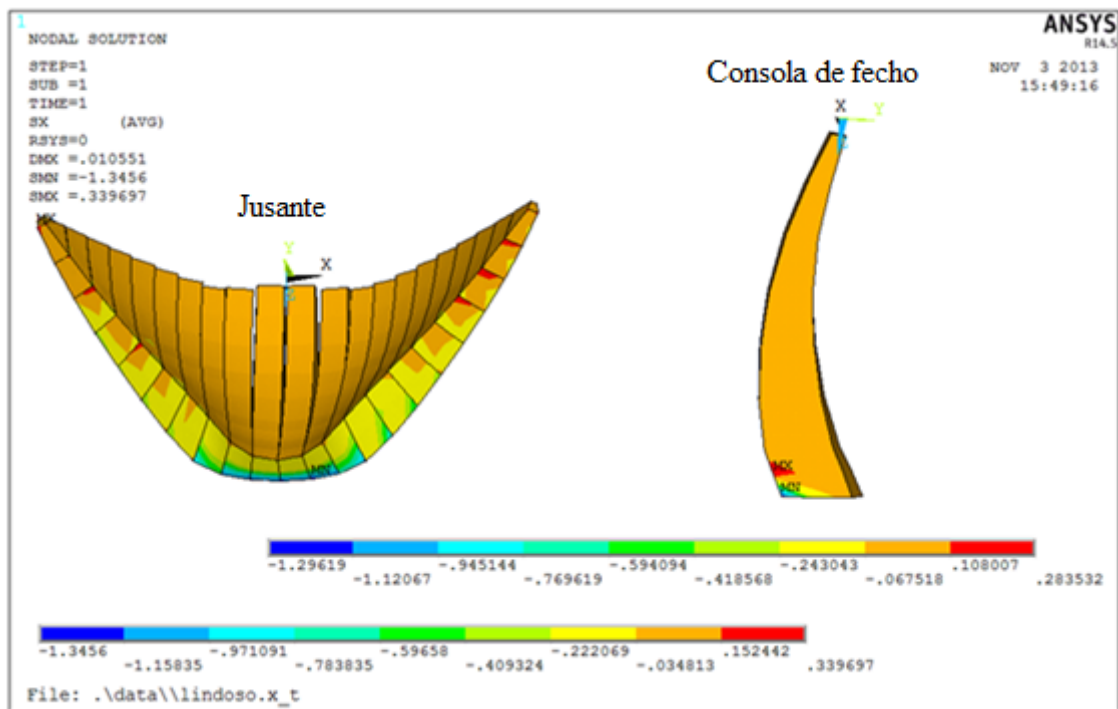


Fig. 59 – Tensões horizontais (σ_x) na direção dos blocos devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas abertas (MPa)

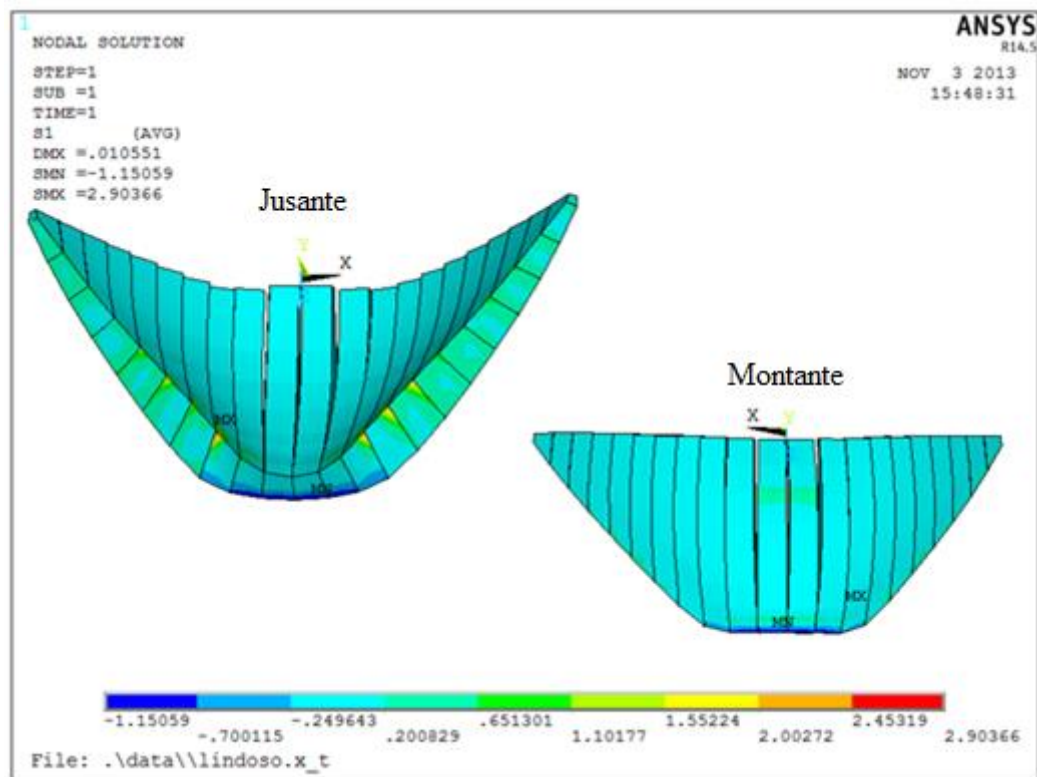


Fig. 60 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas abertas (MPa)

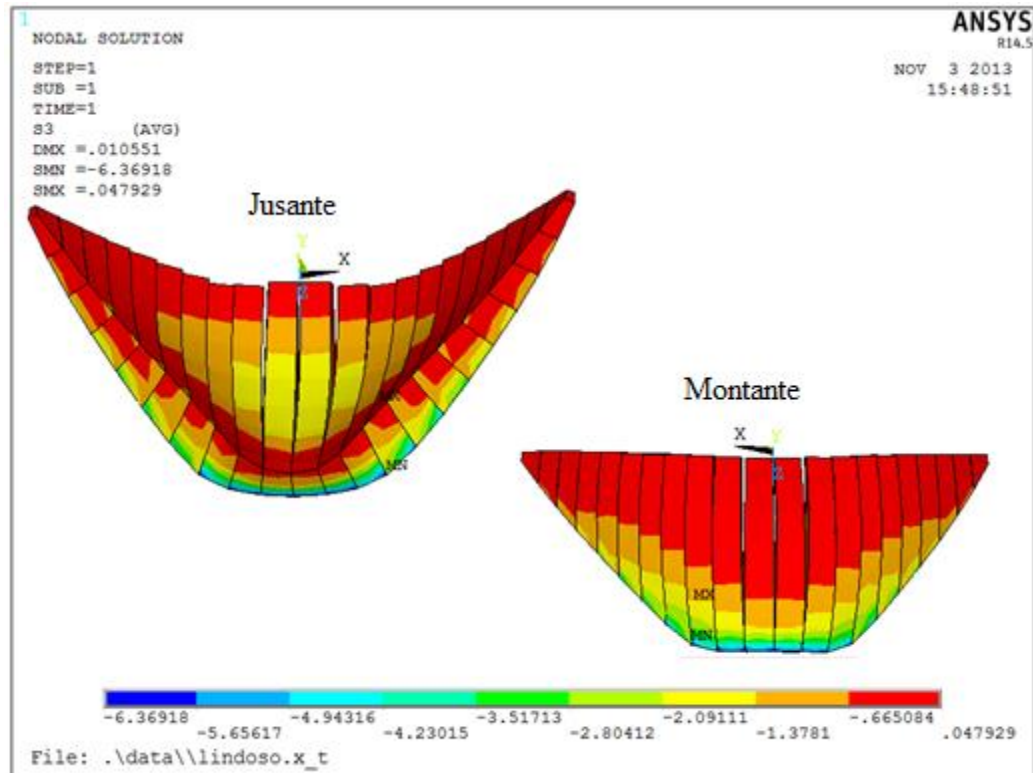


Fig. 61 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas abertas (MPa)

7.2.2. COM JUNTAS FECHADAS

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados da ação do peso próprio com juntas fechadas.

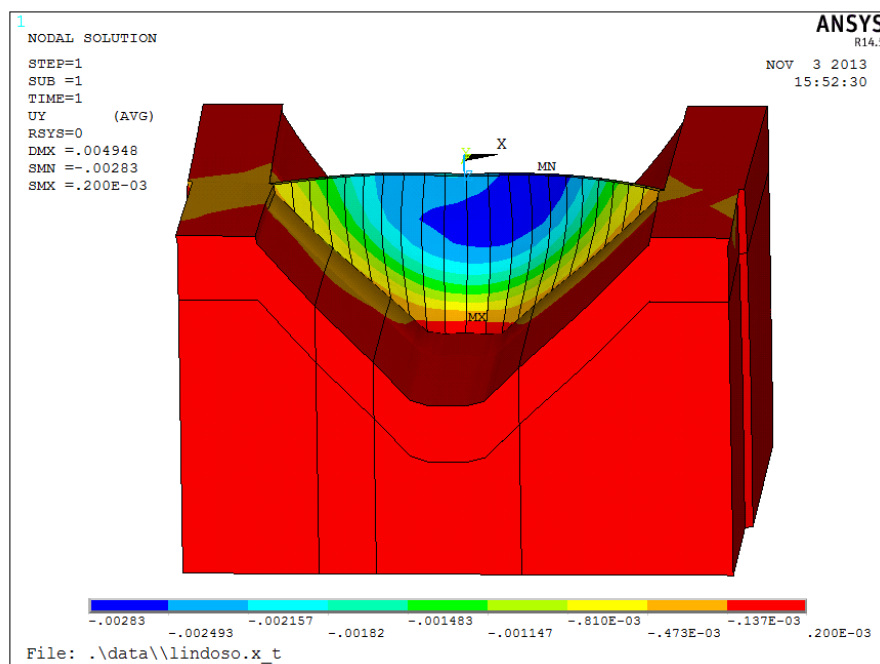


Fig. 62 – Deslocamento radial devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas fechadas (m)

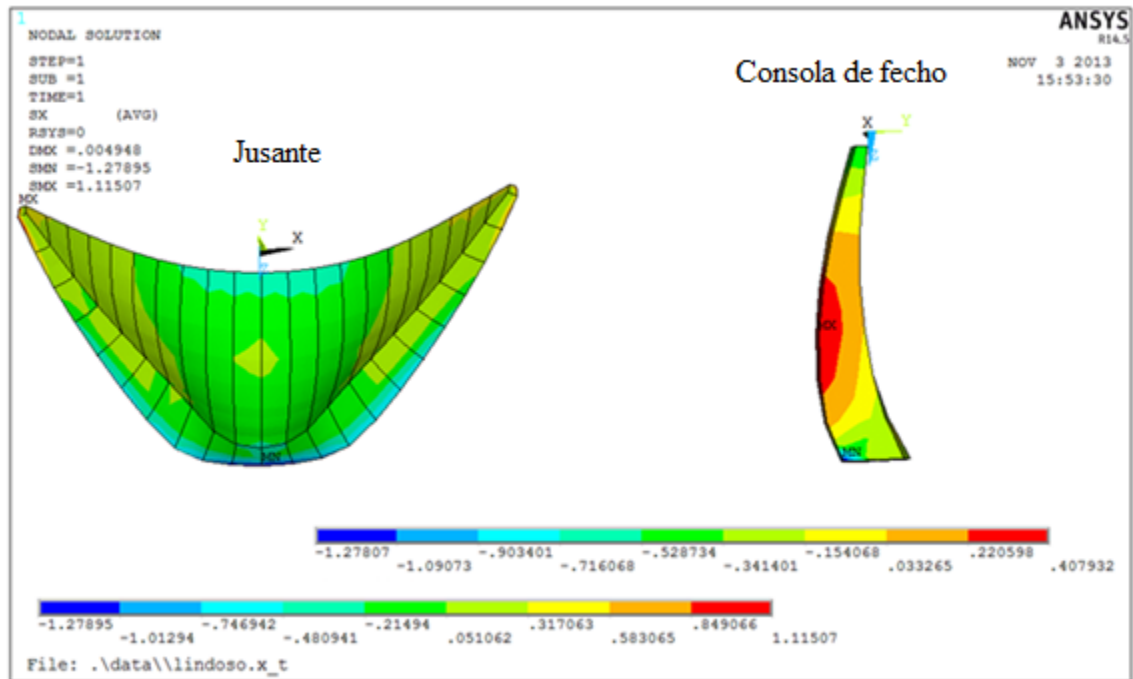


Fig. 63 – Tensões horizontais (σ_x) na direção dos blocos devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas fechadas (MPa)

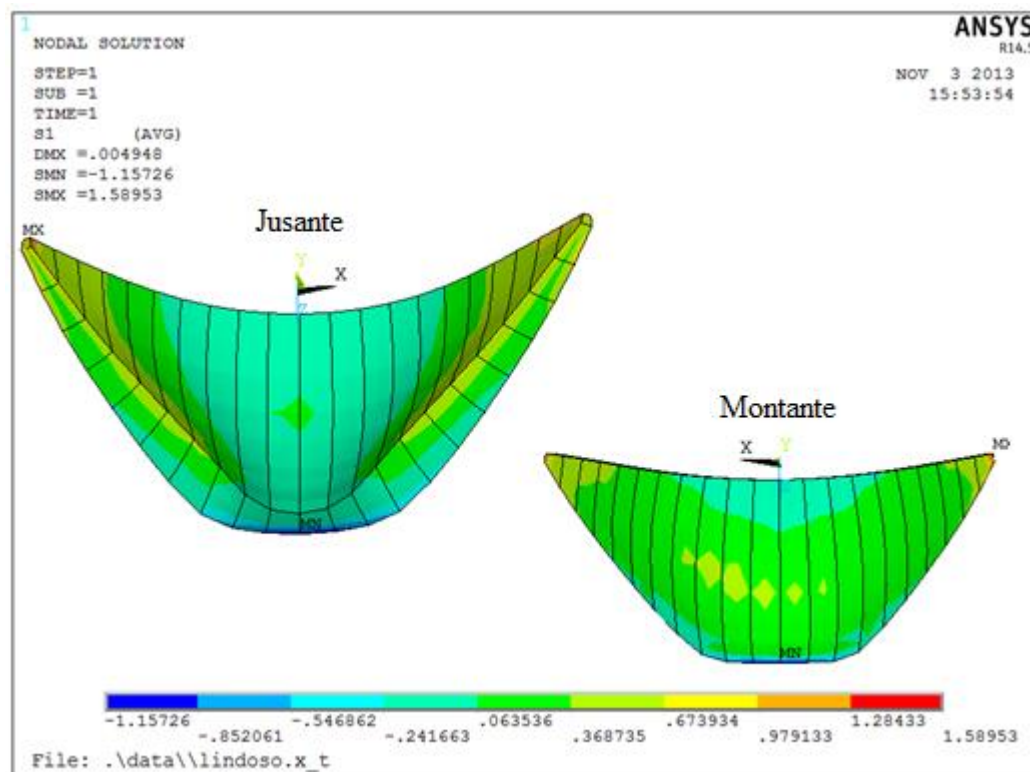


Fig. 64 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas fechadas (MPa)

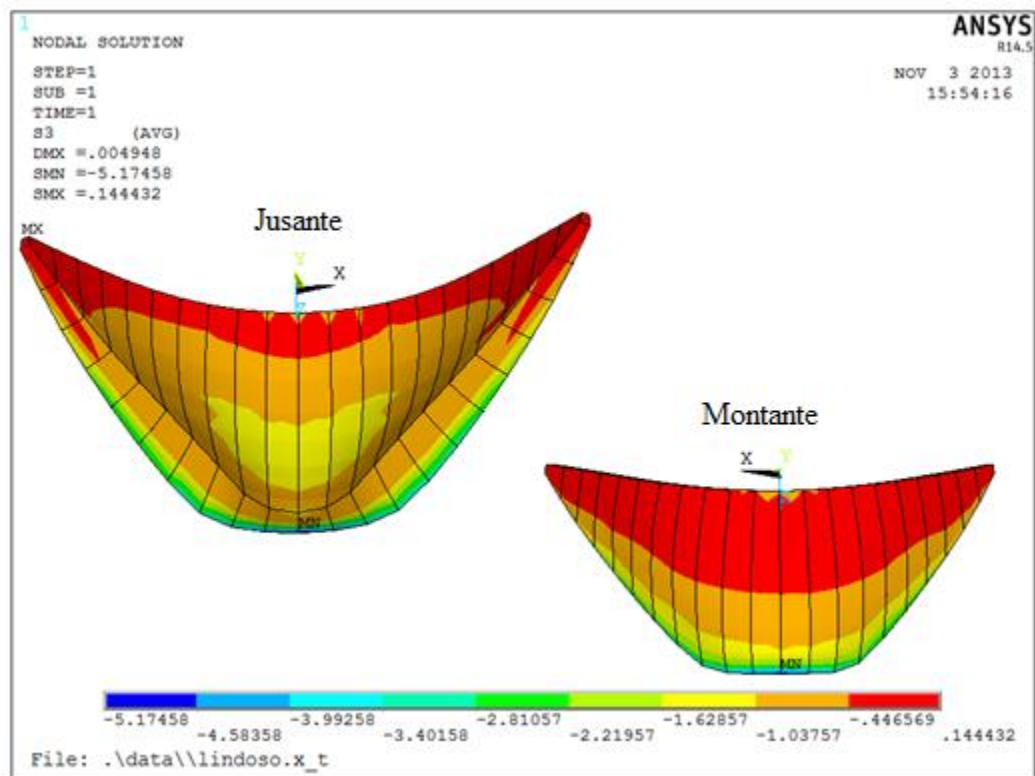


Fig. 65 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à ação do peso próprio com a barragem com juntas fechadas (MPa)

7.2.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.2.3.1. Deslocamentos radiais

Os deslocamentos radiais são os deslocamentos em direção a montante/jusante da barragem, ou seja, são paralelos à junta de fecho e perpendiculares aos blocos centrais da barragem. Nas figuras 58 e 62 são apresentados os deslocamentos radiais devido ao peso próprio, considerando as juntas de contração abertas (não injetadas) e fechadas, respetivamente. Como é normal, a estrutura apresenta um deslocamento para montante, o que favorece a aplicação futura da pressão hidrostática.

No topo da junta central, o deslocamento radial é de -0,01 mm considerando as juntas abertas, e -2,19 mm considerando as juntas fechadas (orientação negativa para montante).

Pela análise do gráfico 1, verifica-se que a junta central, possui, na barragem com juntas abertas, o máximo valor do deslocamento radial à cota 62 e na barragem com juntas fechadas, ocorre à cota 79. A barragem com juntas abertas, possui deslocamentos radiais muito superiores, sensivelmente o dobro, até atingir o seu máximo valor, quando comparada com a barragem de juntas fechadas. Todavia, a partir dessa cota, no caso da barragem com juntas abertas há uma redução significativa dos deslocamentos radiais, em contrapartida para a barragem com juntas fechadas, existe apenas uma ligeira diminuição do valor destes deslocamentos.

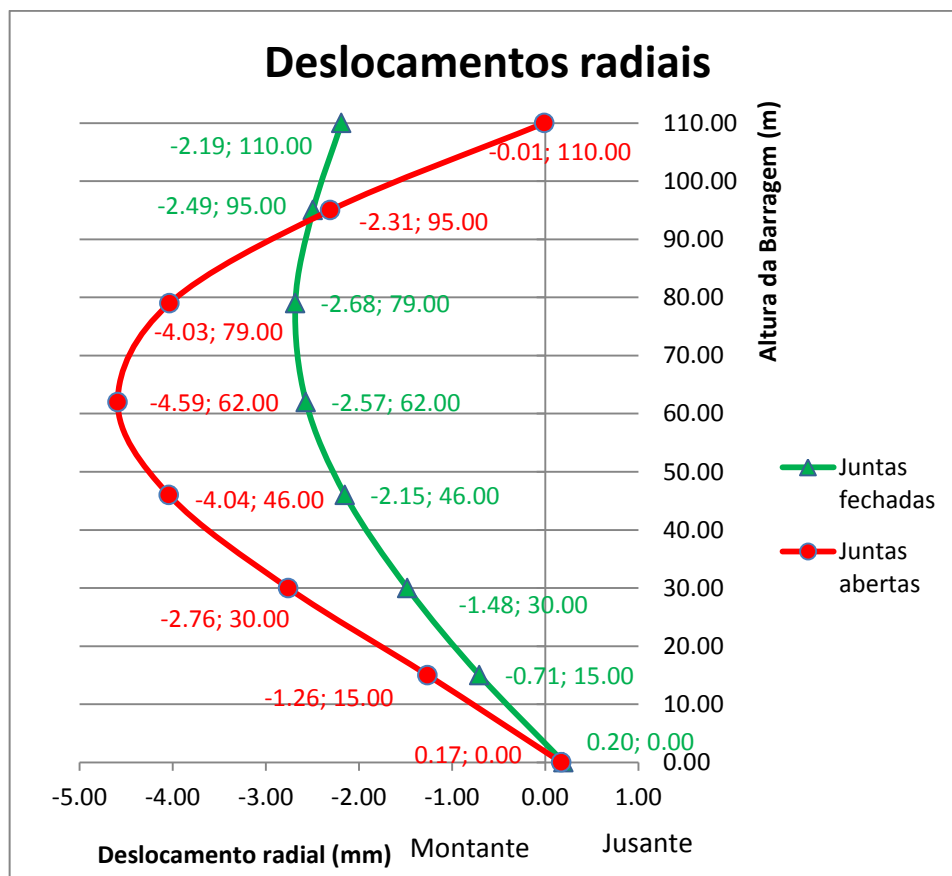


Gráfico 1 – Deslocamentos radiais dos blocos centrais no paramento de montante devido ao peso próprio.

7.2.3.2. Abertura da junta central da barragem

O gráfico 2, referente ao movimento da face da junta entre os blocos 11 e 12, pode ser uma forma de avaliar se a aplicação dos couples aos pares de nós das juntas foi realizada com sucesso. Como previsto, no caso da barragem com juntas não injetadas (juntas abertas), verifica-se a ocorrência da abertura da junta central, em oposição à barragem com juntas fechadas que não apresenta qualquer abertura da junta.

As quatro curvas apresentam uma ligeira inclinação, motivada pela não simetria geométrica da estrutura.

Pelo gráfico 2, referente à abertura da junta central da barragem, constata-se que o valor máximo é atingido, no caso da barragem com juntas abertas, à cota 79 m.

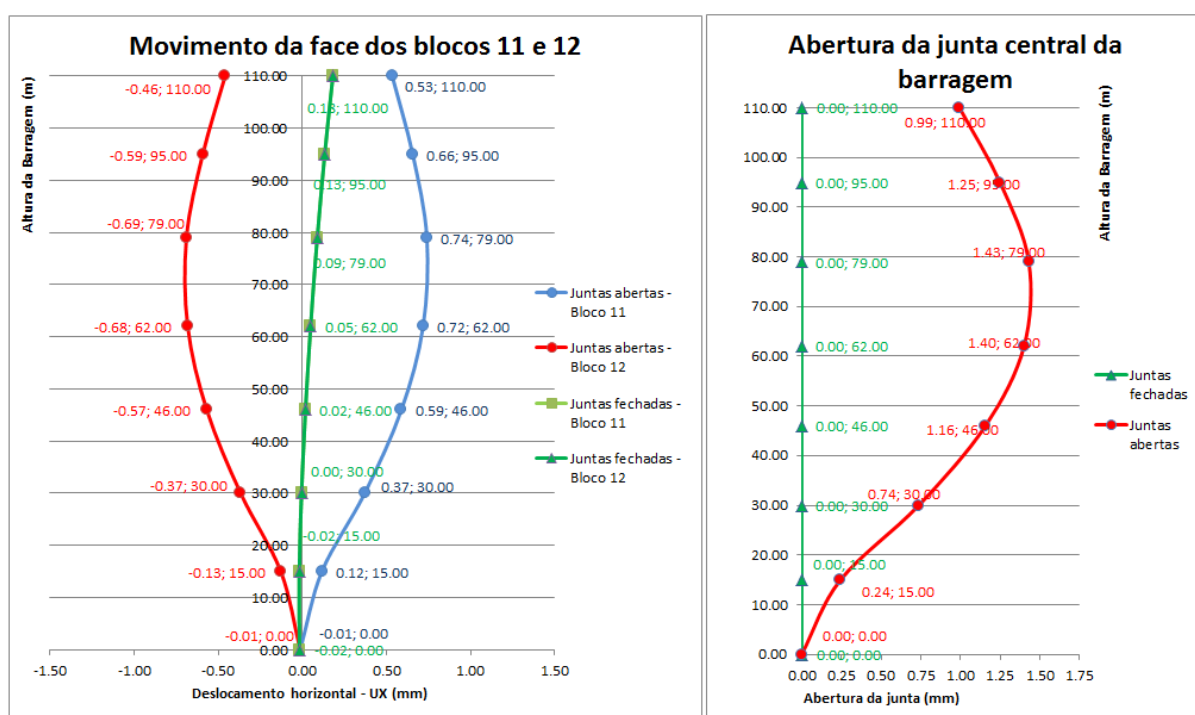


Gráfico 2 - Movimento das faces dos blocos 11 e 12 e Abertura da junta central no paramento de montante devido ao peso próprio.

7.2.3.3. Tensões principais

Como se constata no gráfico 3 e pelas figuras referentes às tensões principais máximas e mínimas devidas ao peso próprio aquando das juntas abertas e juntas fechadas, a barragem apresenta na sua base, tensões de tração para o paramento de jusante, e tensões de compressão para o paramento de montante. Verifica-se também, que no paramento de montante, as trações de maior valor, ocorrem na zona central da barragem e as tensões de tração aumentam com a profundidade, atingindo o seu máximo valor junto ao pé da barragem. Todavia, no paramento de jusante da barragem com juntas fechadas, as tensões de trações vão aumentando em direção a ambas as margens.

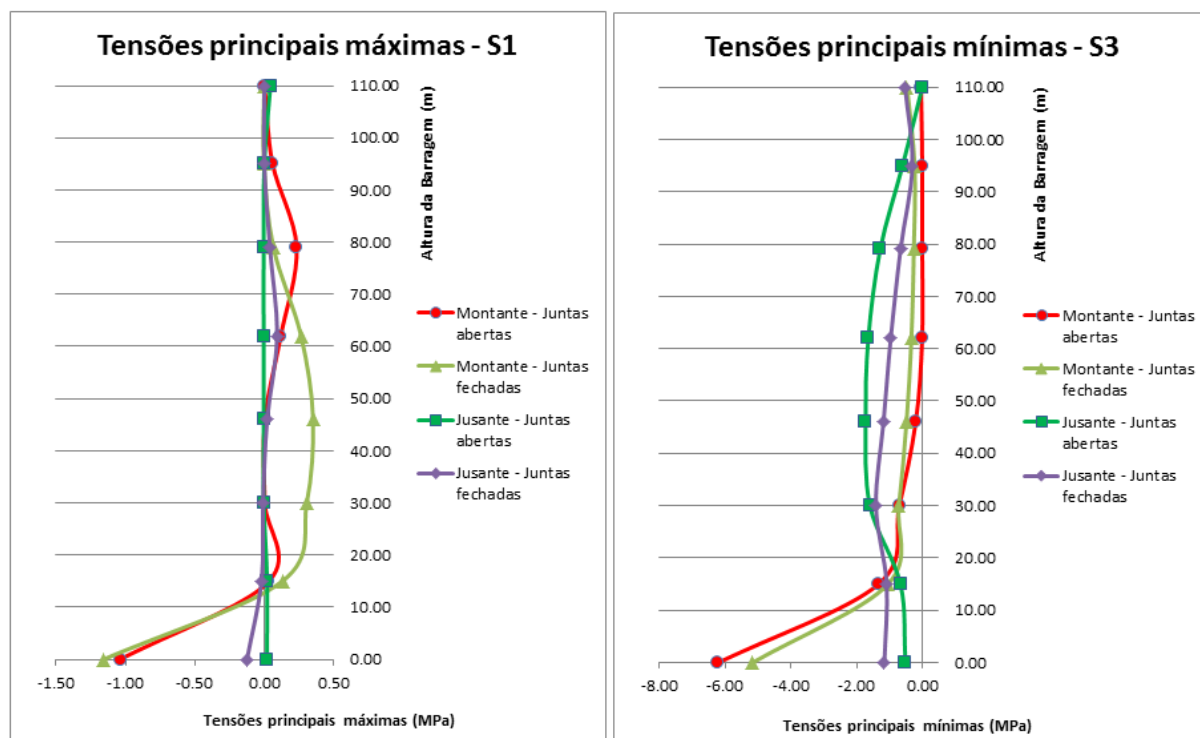


Gráfico 3 – Tensões principais máximas e mínimas ao longo da junta central no paramento de montante e jusante devido ao peso próprio.

		Barragem com Juntas Abertas				Barragem com Juntas Fechadas			
		Jusante		Montante		Jusante		Montante	
		S1	S3	S1	S3	S1	S3	S1	S3
Cotas dos patamares (m)	110.00	0.046	0.002	0.003	-0.038	0.002	-0.527	0.001	-0.465
	95.00	0.002	-0.602	0.061	-0.003	0.001	-0.305	0.000	-0.234
	79.00	-0.003	-1.284	0.235	-0.003	0.042	-0.664	0.067	-0.258
	62.00	-0.003	-1.646	0.120	-0.002	0.093	-0.961	0.267	-0.333
	46.00	-0.002	-1.726	0.006	-0.201	0.022	-1.182	0.353	-0.483
	30.00	-0.002	-1.597	0.006	-0.702	-0.008	-1.413	0.308	-0.717
	15.00	0.022	-0.665	0.035	-1.338	-0.018	-1.086	0.132	-1.048
	0.00	0.021	-0.515	-1.038	-6.216	-0.124	-1.154	-1.157	-5.173

Tabela 11 – Tensões principais ao longo da junta central a jusante e a montante, devido à ação do peso próprio (MPa).

7.3. INJEÇÃO DAS JUNTAS DE CONTRAÇÃO

7.3.1. ESTRATÉGIA DE INJEÇÃO 1

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados da aplicação da pressão de injeção pela estratégia de injeção 1.

7.3.1.1. Deslocamentos radiais

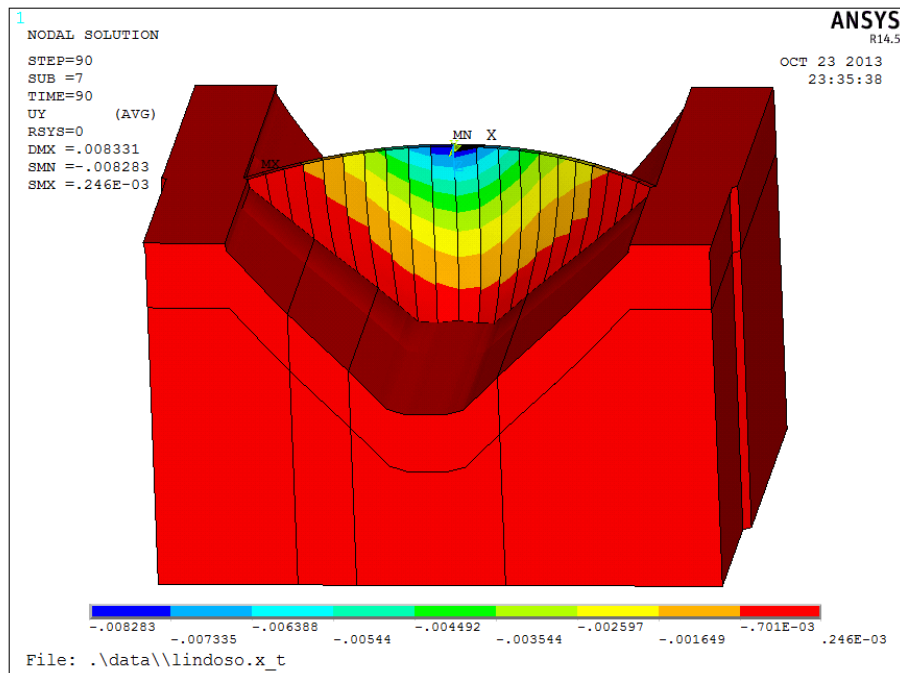


Fig. 66 – Deslocamento radial devido à estratégia de injeção 1 (m)

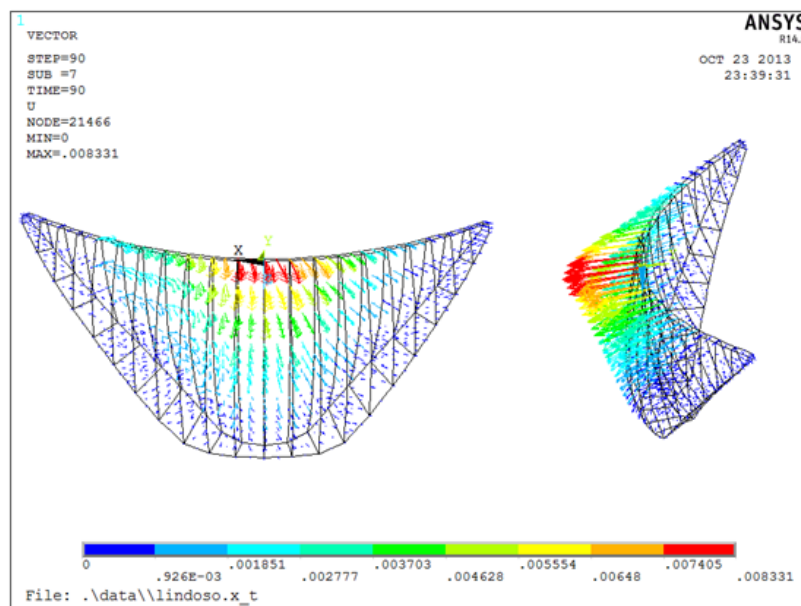


Fig. 67 – Vetores de deslocamentos devido à estratégia de injeção 1 (m)

7.3.1.2. Tensões Horizontais

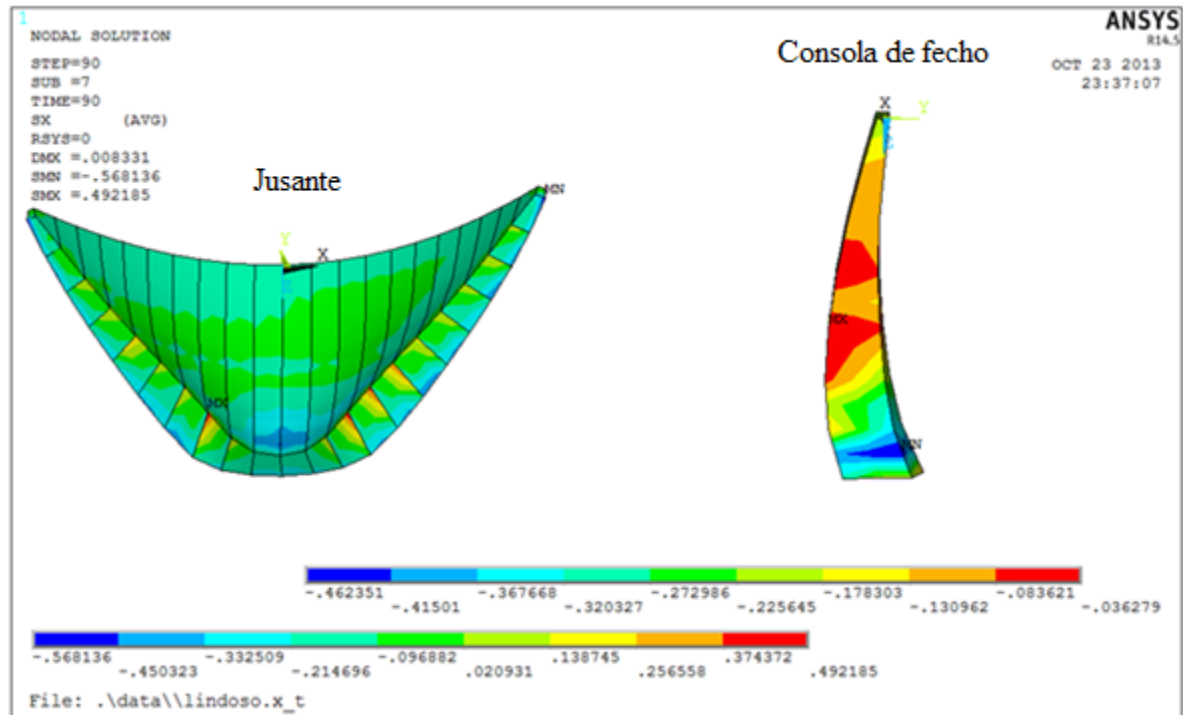


Fig. 68 – Tensões horizontais σ_x devido à estratégia de injeção 1 (MPa)

7.3.1.3. Tensões principais

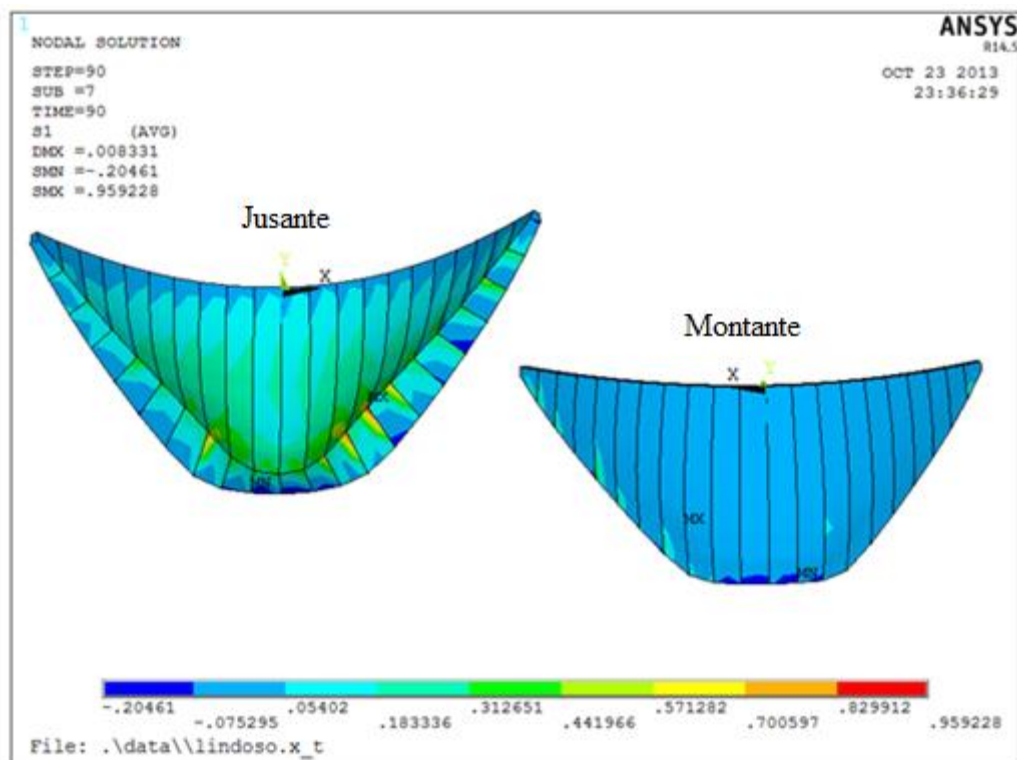


Fig. 69 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à estratégia de injeção 1 (MPa)

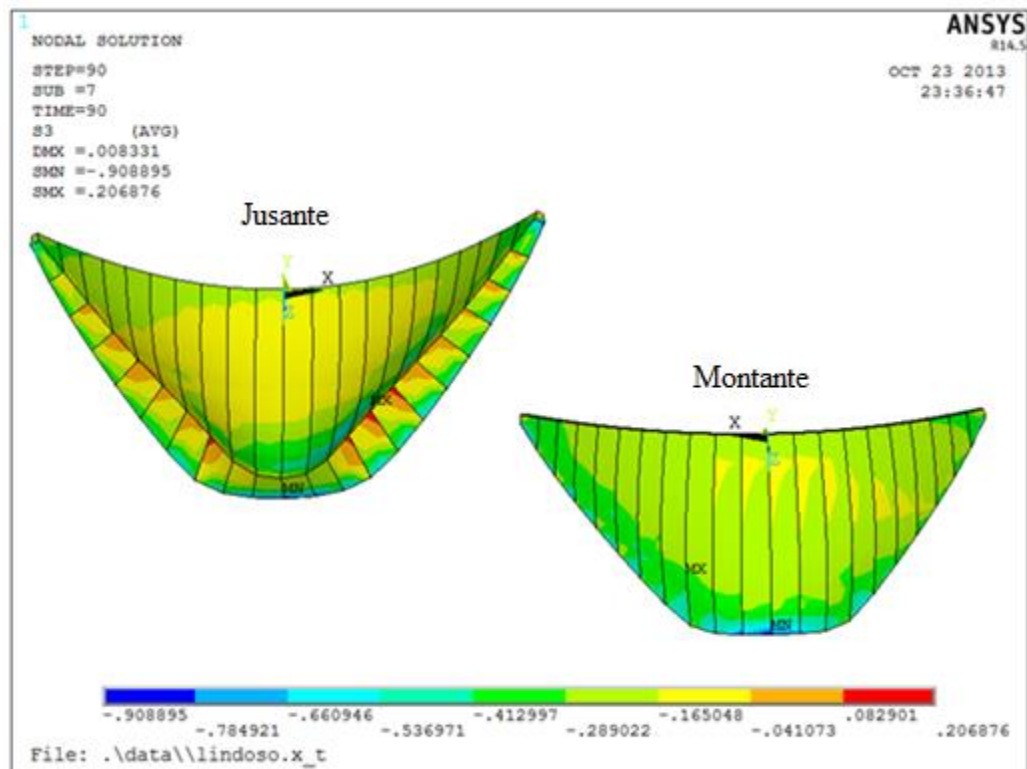


Fig. 70 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à estratégia de injeção 1 (MPa)

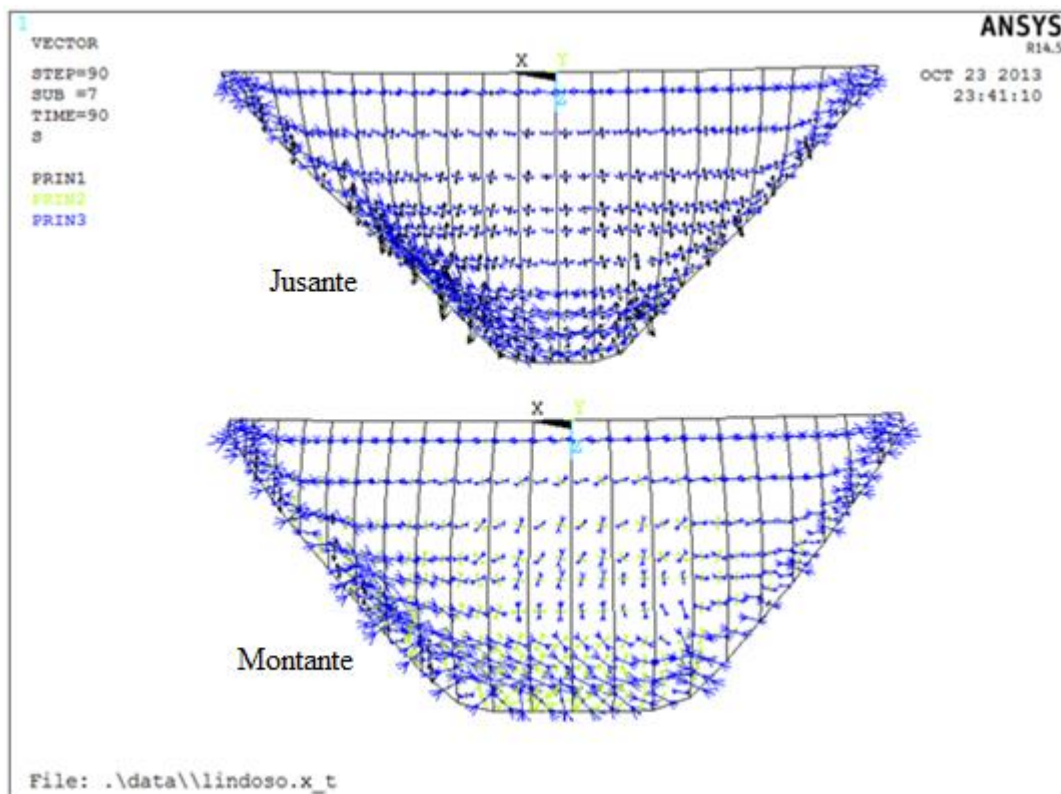


Fig. 71 – Direção das tensões principais no paramento de jusante e montante respetivamente, devido à estratégia de injeção 1

7.3.2. ESTRATÉGIA DE INJEÇÃO 2

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados da aplicação da pressão de injeção pela estratégia de injeção 2.

7.3.2.1. Deslocamentos

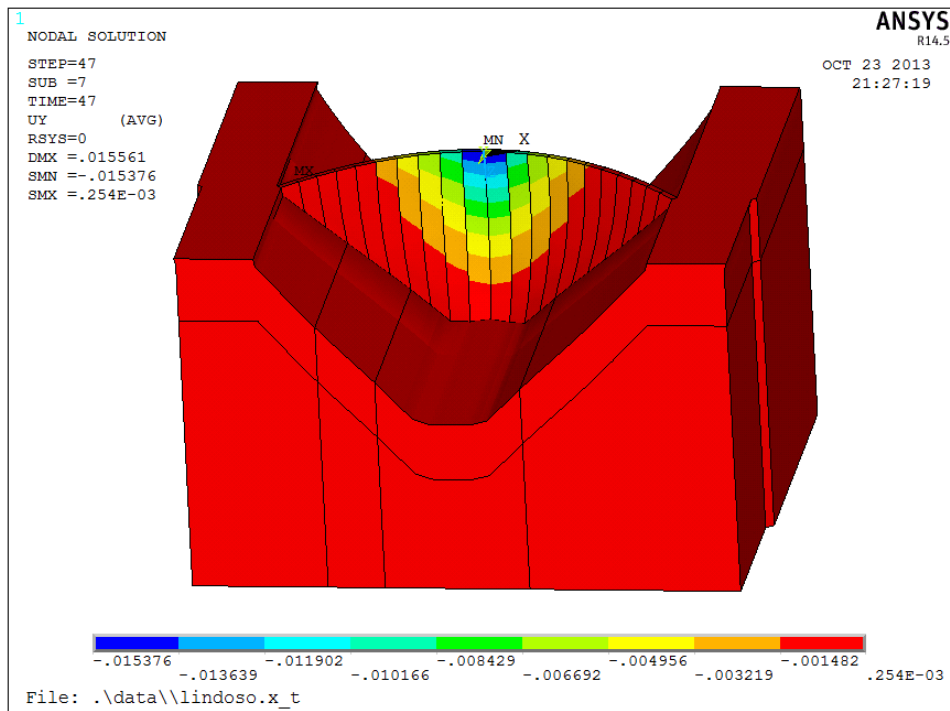


Fig. 72 – Deslocamento radial devido à estratégia de injeção 2 (m)

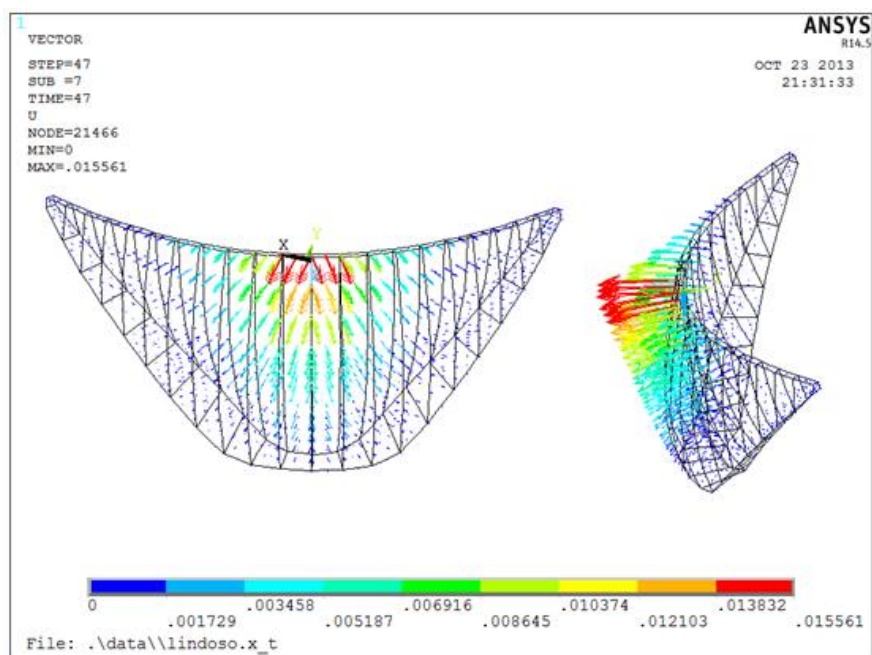


Fig. 73 – Vetores de deslocamentos devido à estratégia de injeção 2 (m)

7.3.2.2. Tensões Horizontais

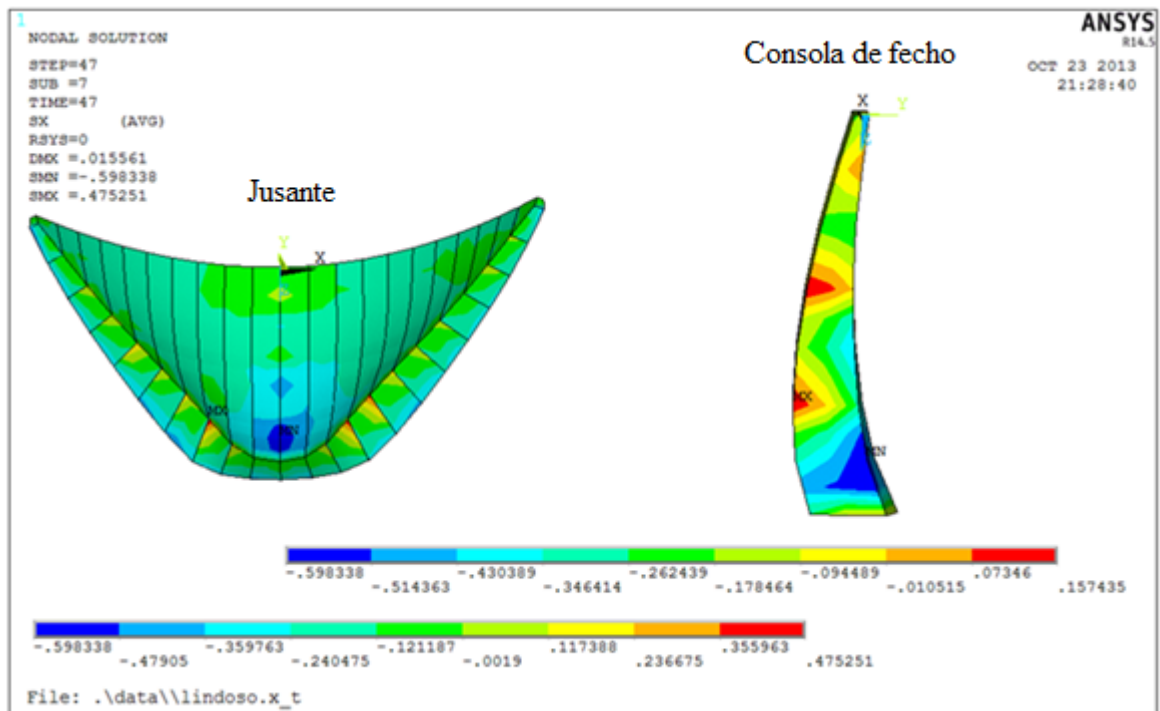


Fig. 74 – Tensões horizontais σ_x devido à estratégia de injeção 2 (MPa)

7.3.2.3. Tensões principais

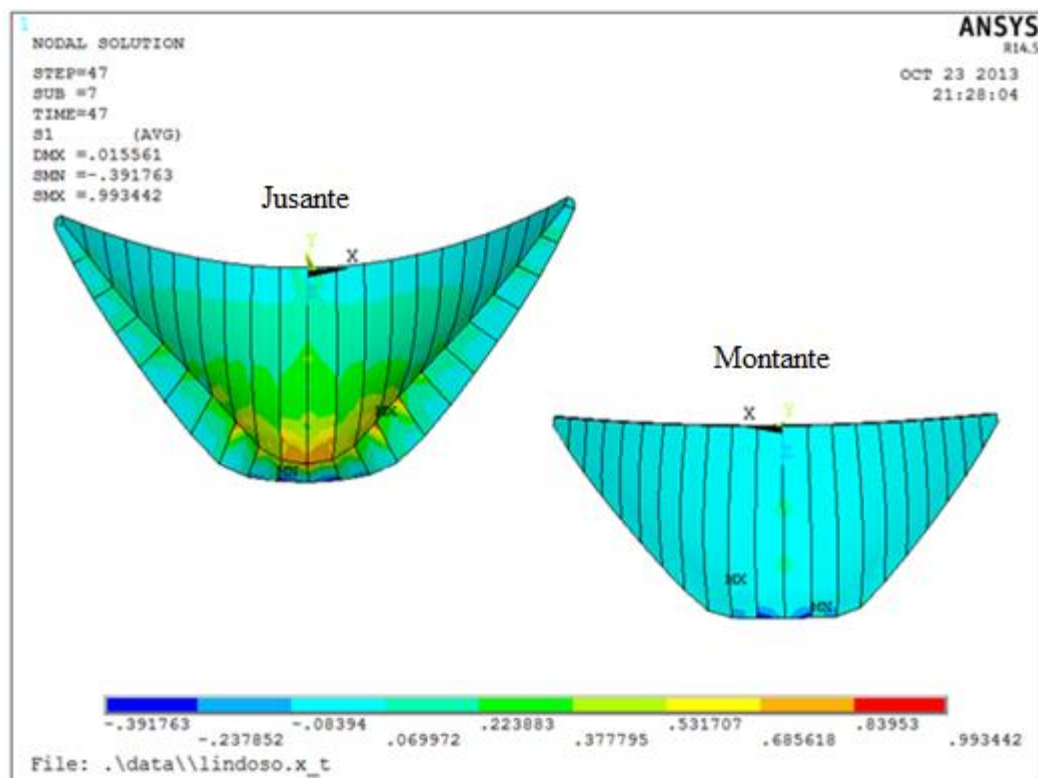


Fig. 75 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à estratégia de injeção 2 (MPa)

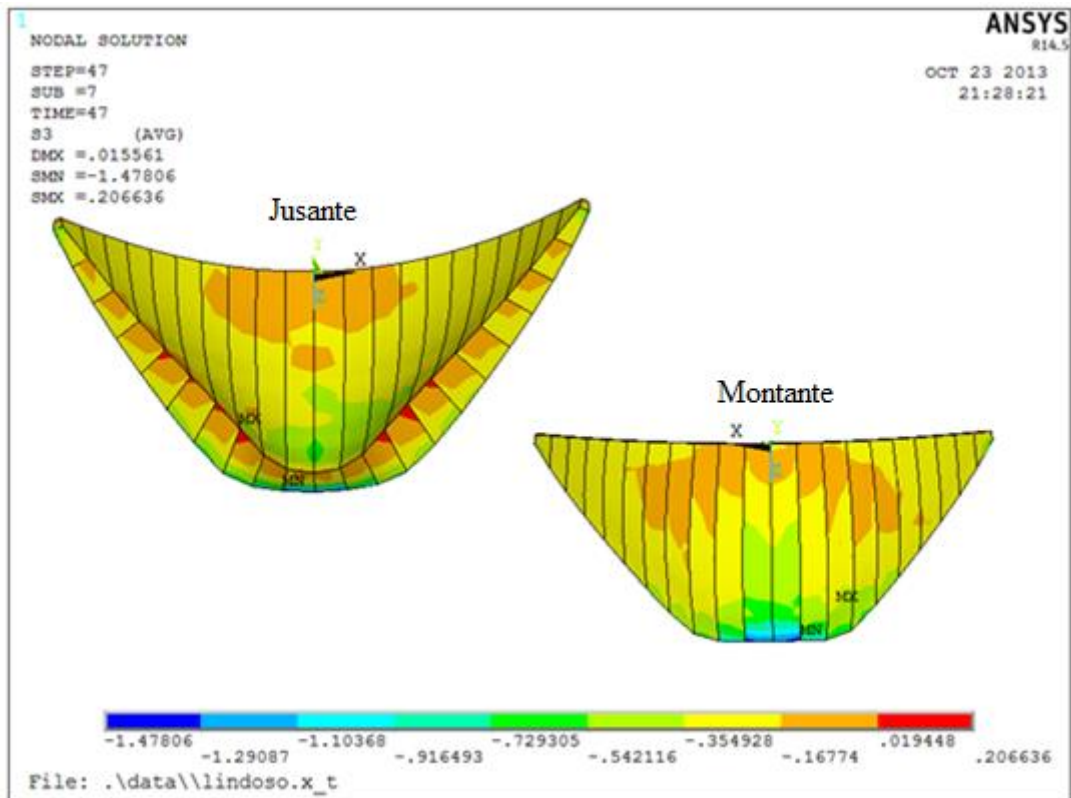


Fig. 76 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à estratégia de injeção 2 (MPa)

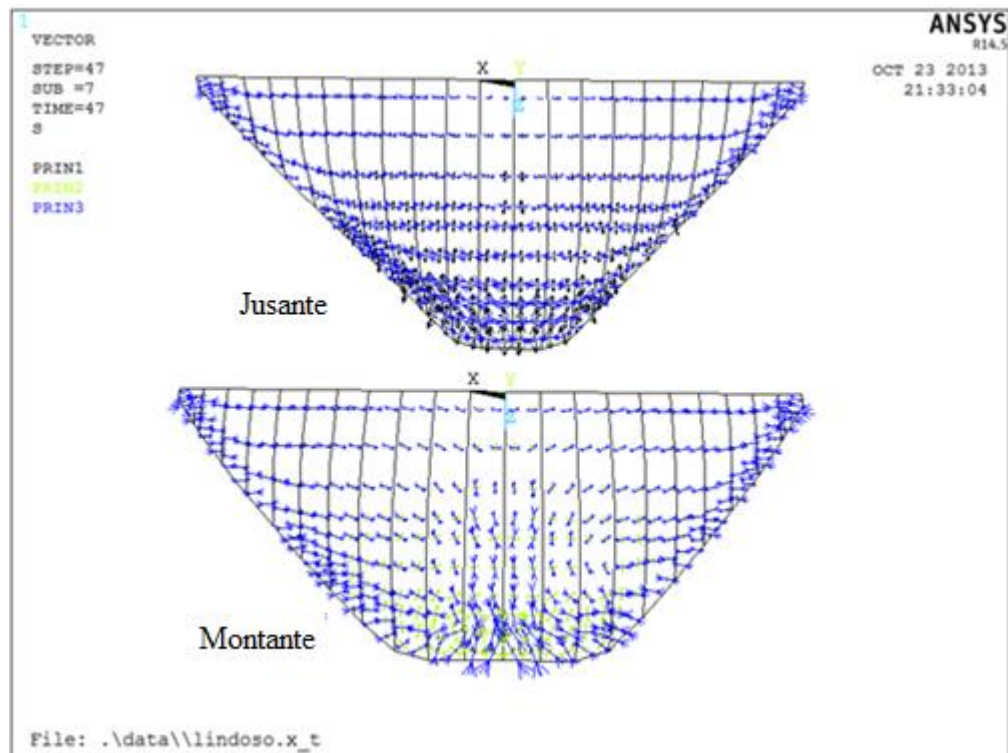


Fig. 77 – Direção das tensões principais no paramento de jusante e montante respectivamente, devido à estratégia de injeção 2

7.3.3. ESTRATÉGIA DE INJEÇÃO 3

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados da aplicação da pressão de injeção pela estratégia de injeção 3.

7.3.3.1. Deslocamentos

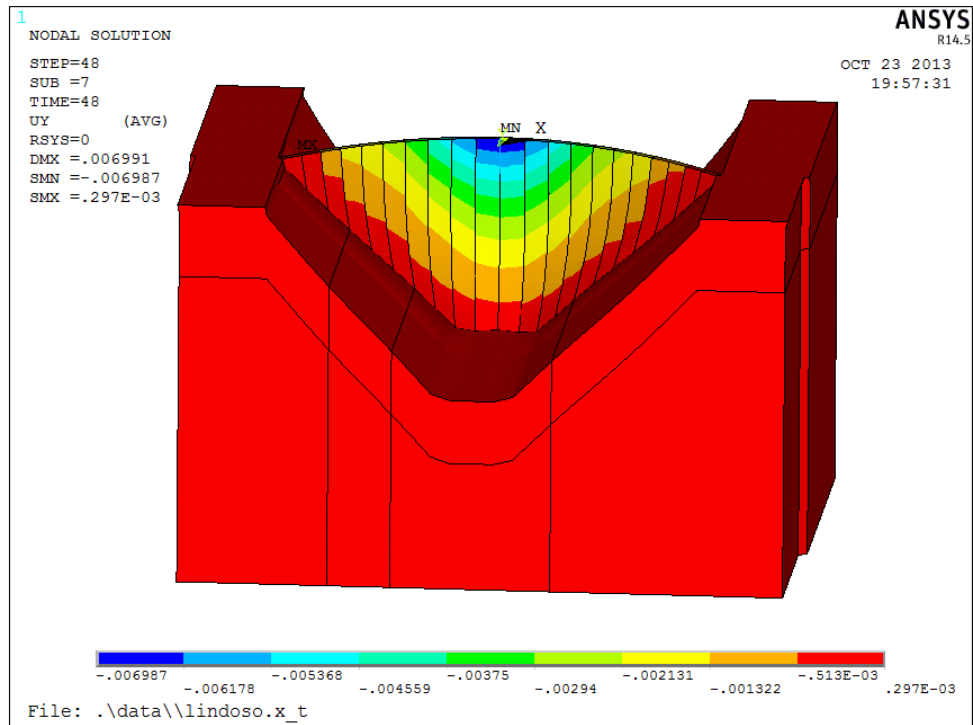


Fig. 78 – Deslocamento radial devido à estratégia de injeção 3 (m)

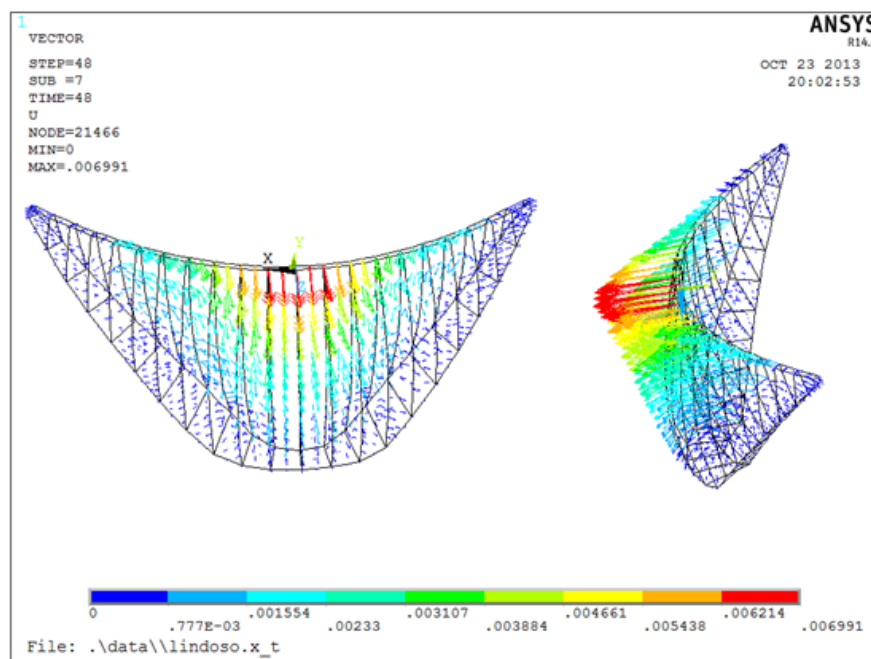


Fig. 79 – Vetores de deslocamentos devido à estratégia de injeção 3 (m)

7.3.3.2. Tensões Horizontais

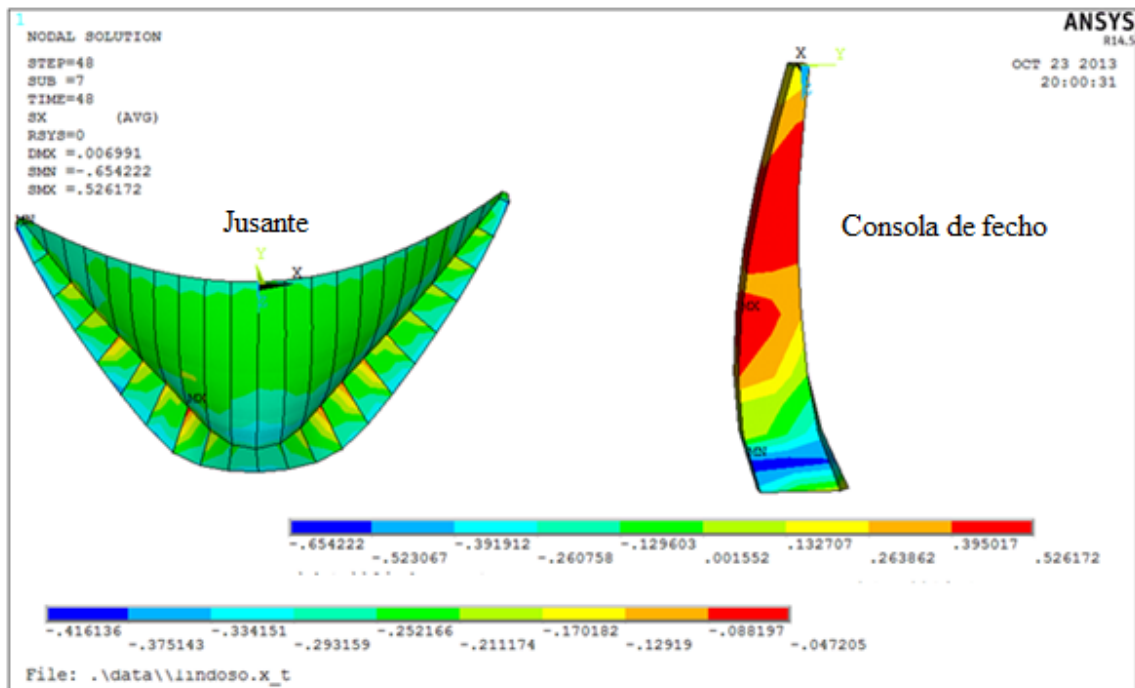


Fig. 80 – Tensões horizontais σ_x devido à estratégia de injeção 3 (MPa)

7.3.3.3. Tensões principais

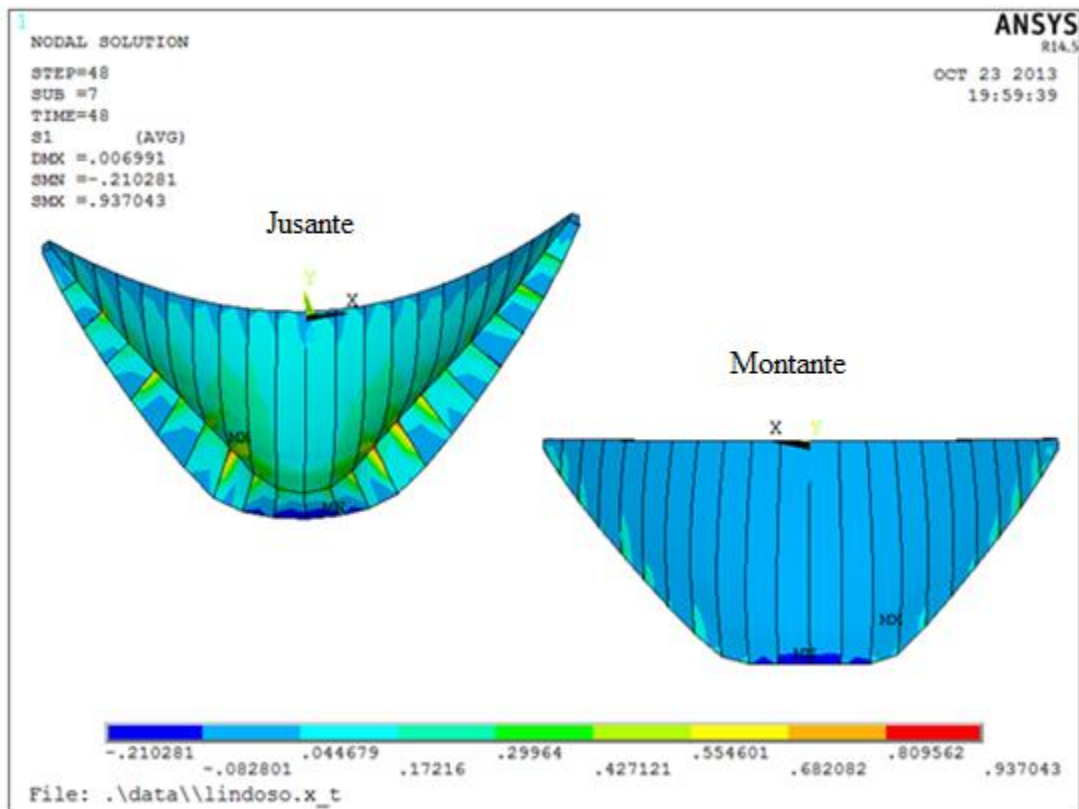


Fig. 81 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à estratégia de injeção 3 (MPa)

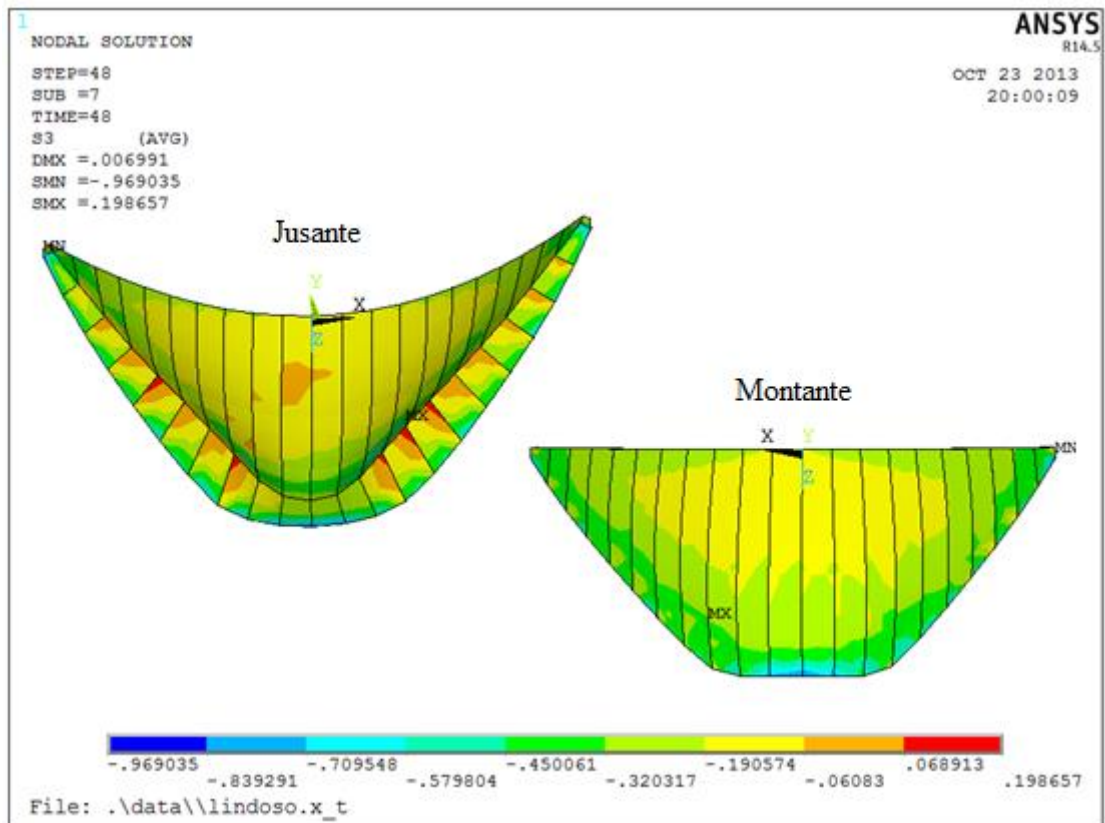


Fig. 82 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à estratégia de injeção 3 (MPa)

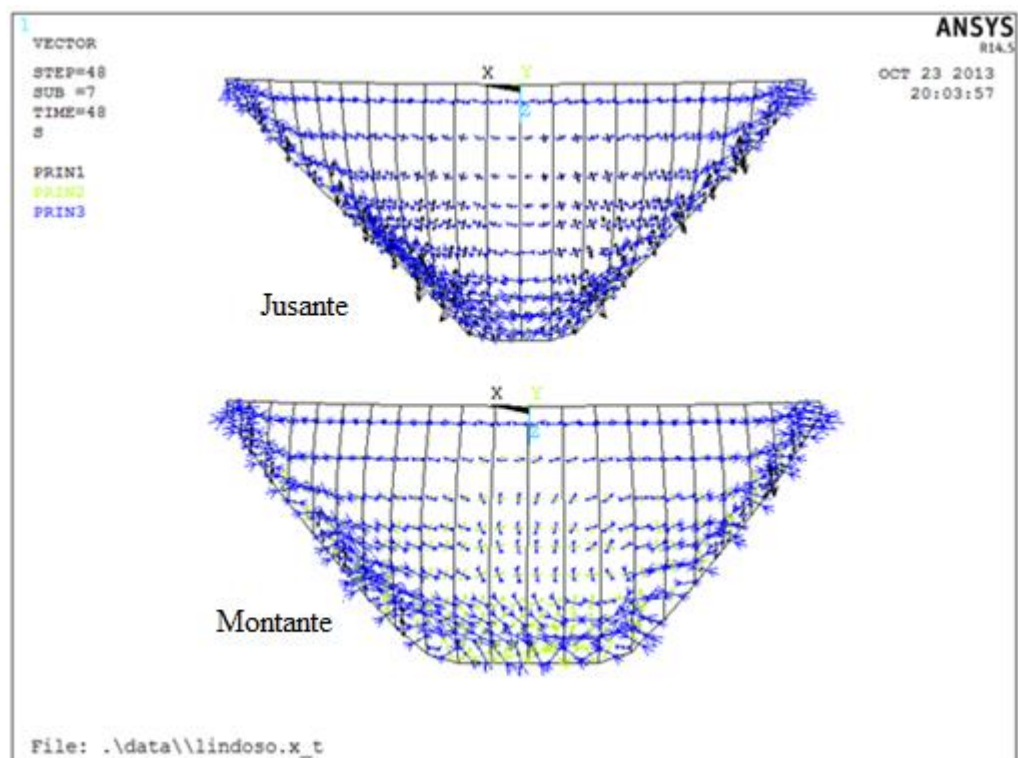


Fig. 83 – Direção das tensões principais no paramento de jusante e montante respectivamente, devido à estratégia de injeção 3

7.3.4. ESTRATÉGIA DE INJEÇÃO 4

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados da aplicação da pressão de injeção pela estratégia de injeção 4.

7.3.4.1. Deslocamentos

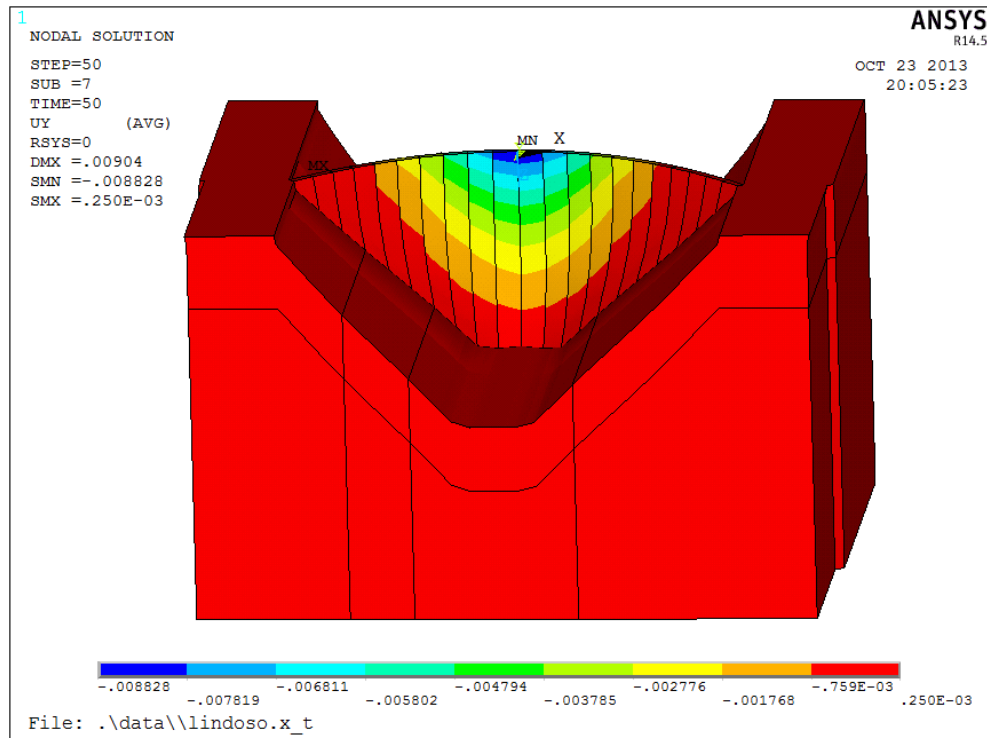


Fig. 84 – Deslocamento radial devido à estratégia de injeção 4 (m)

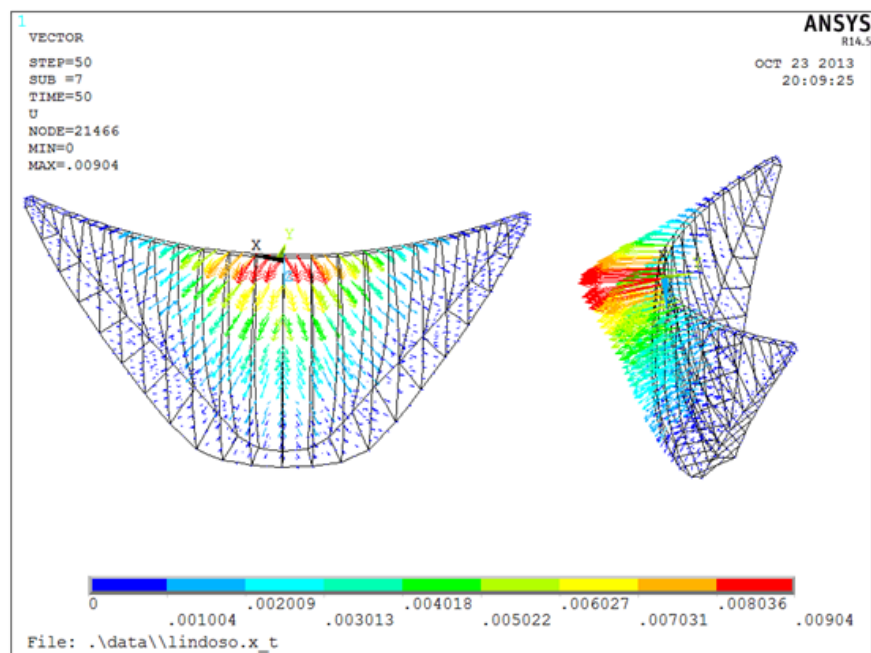


Fig. 85 – Vetores de deslocamentos devido à estratégia de injeção 4 (m)

7.3.4.2. Tensões Horizontais

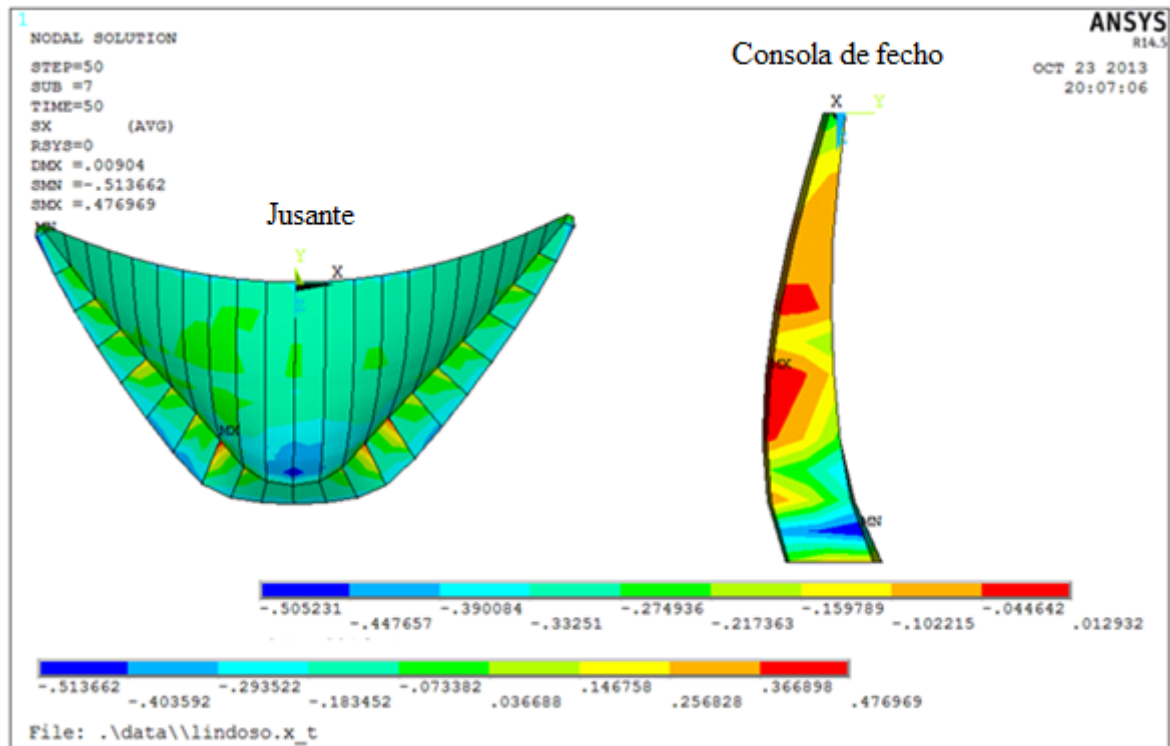


Fig. 86 – Tensões horizontais σ_x devido à estratégia de injeção 4 (MPa)

7.3.4.3. Tensões principais

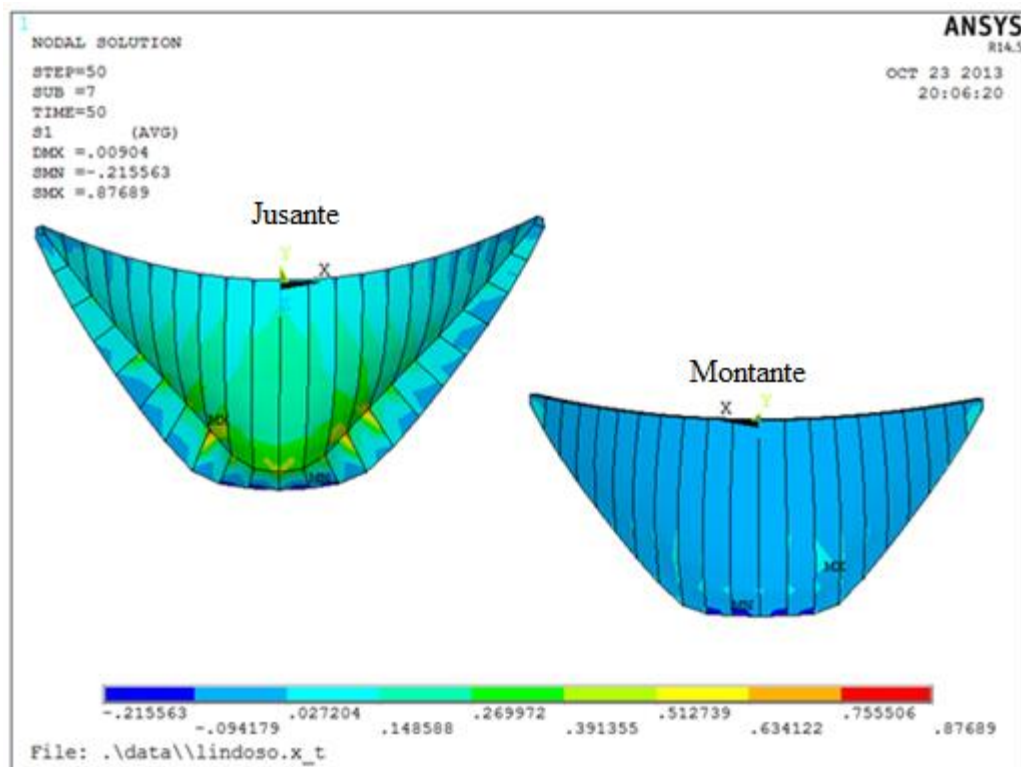


Fig. 87 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à estratégia de injeção 4 (MPa)

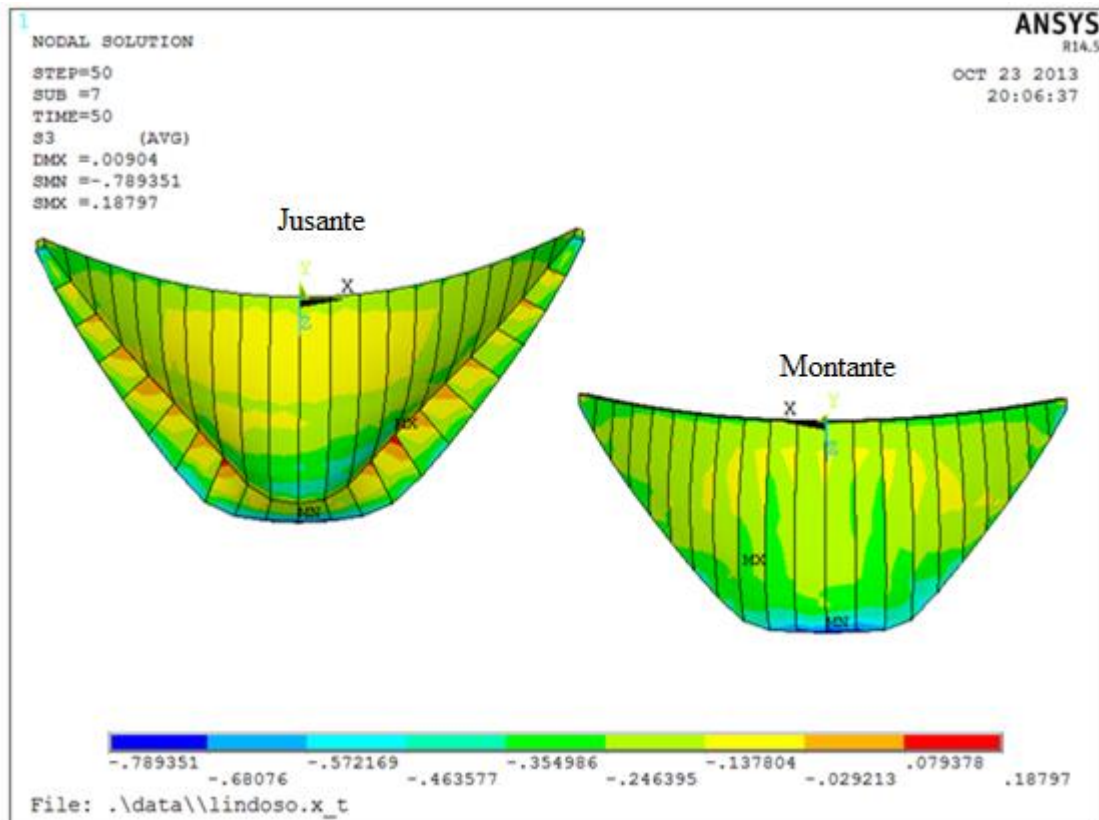


Fig. 88 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à estratégia de injeção 4 (MPa)

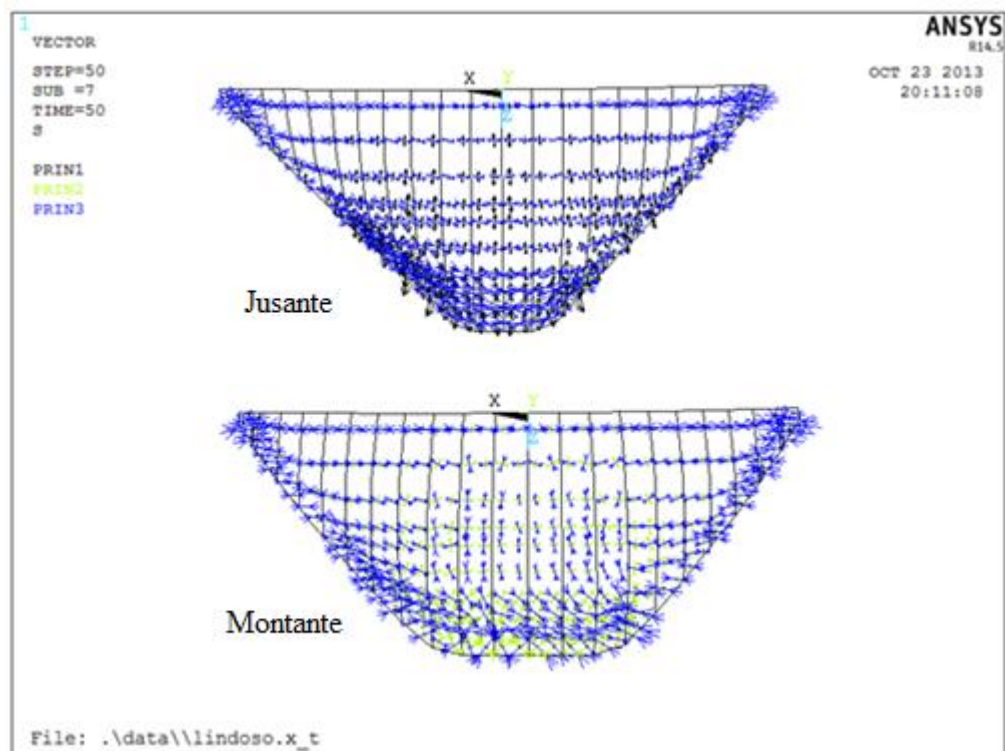


Fig. 89 – Direção das tensões principais no paramento de jusante e montante respetivamente, devido à estratégia de injeção 4

7.3.5. ESTRATÉGIA DE INJEÇÃO 5

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados da aplicação da pressão de injeção pela estratégia de injeção 5.

7.3.5.1. Deslocamentos

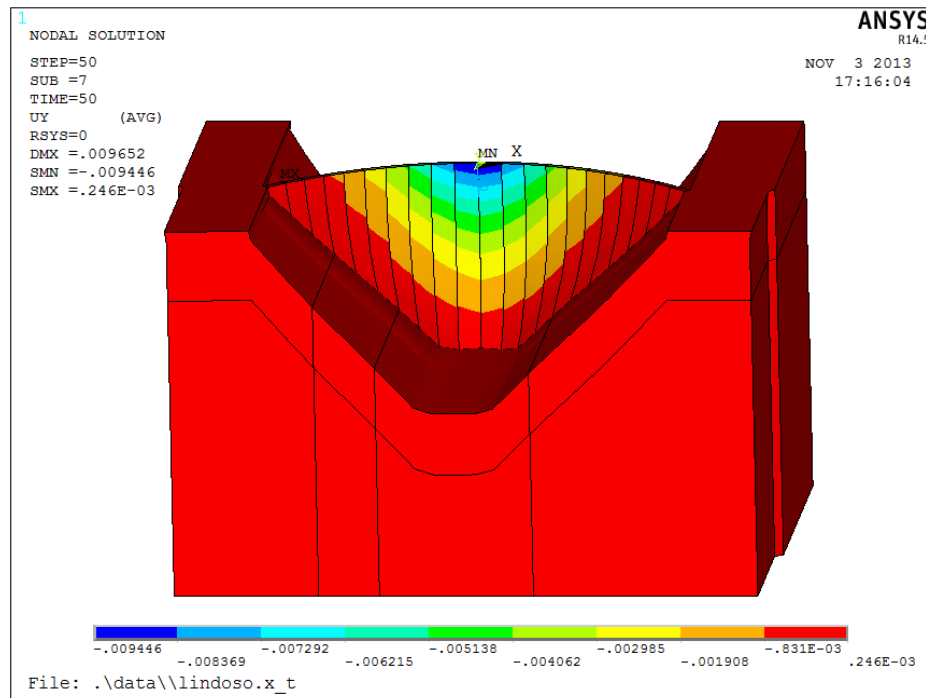


Fig. 90 – Deslocamento radial devido à estratégia de injeção 5 (m)

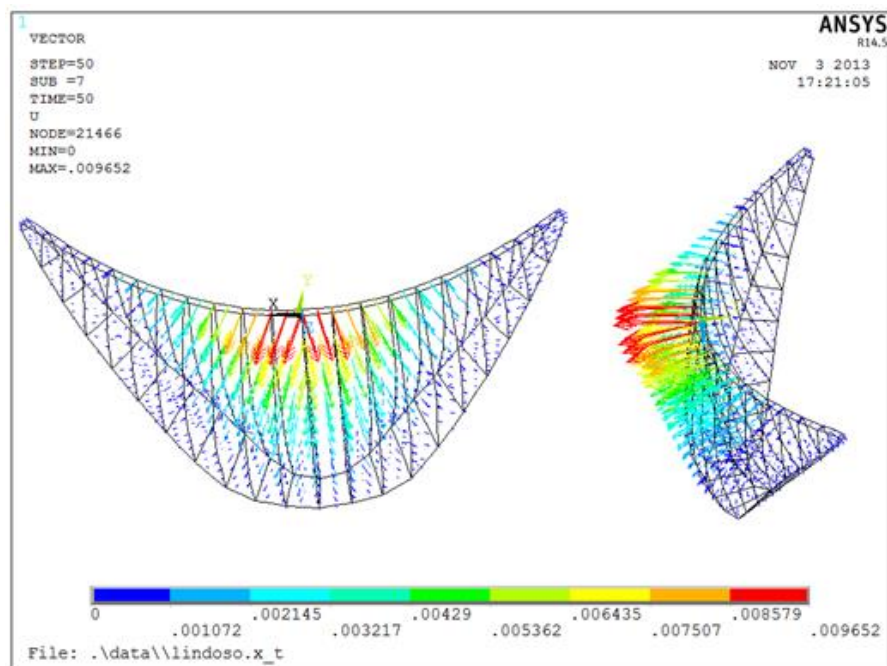


Fig. 91 – Vetores de deslocamentos devido à estratégia de injeção 5 (m)

7.3.5.2. Tensões Horizontais

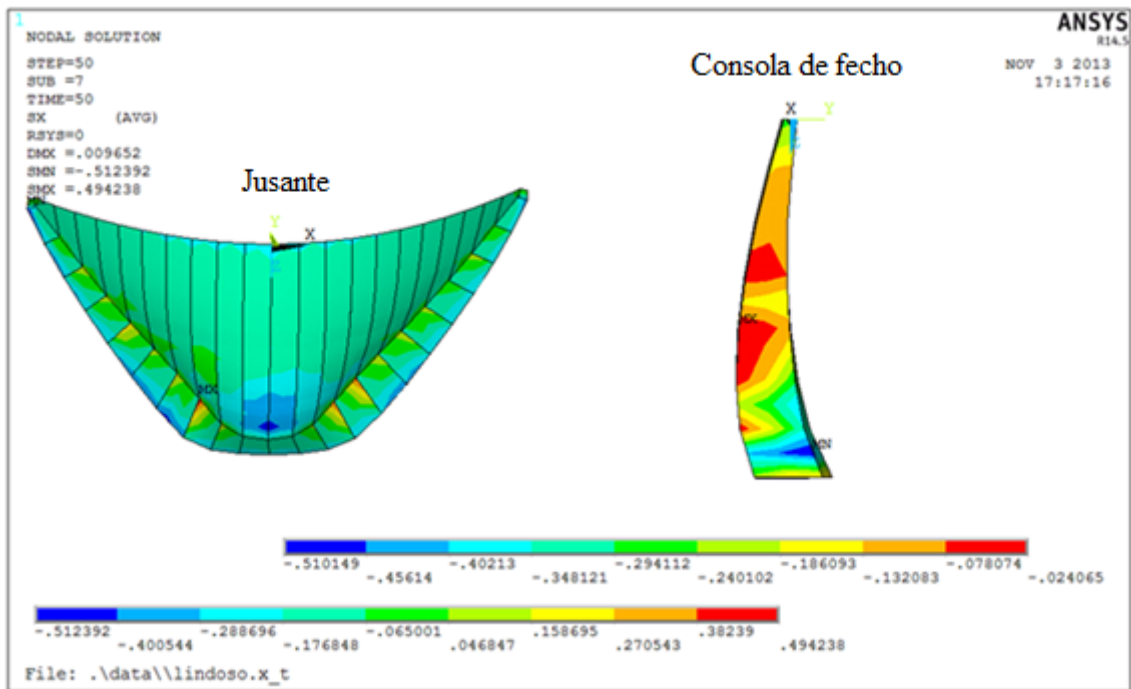


Fig. 92 – Tensões horizontais σ_x devido à estratégia de injeção 5 (MPa)

7.3.5.3. Tensões principais

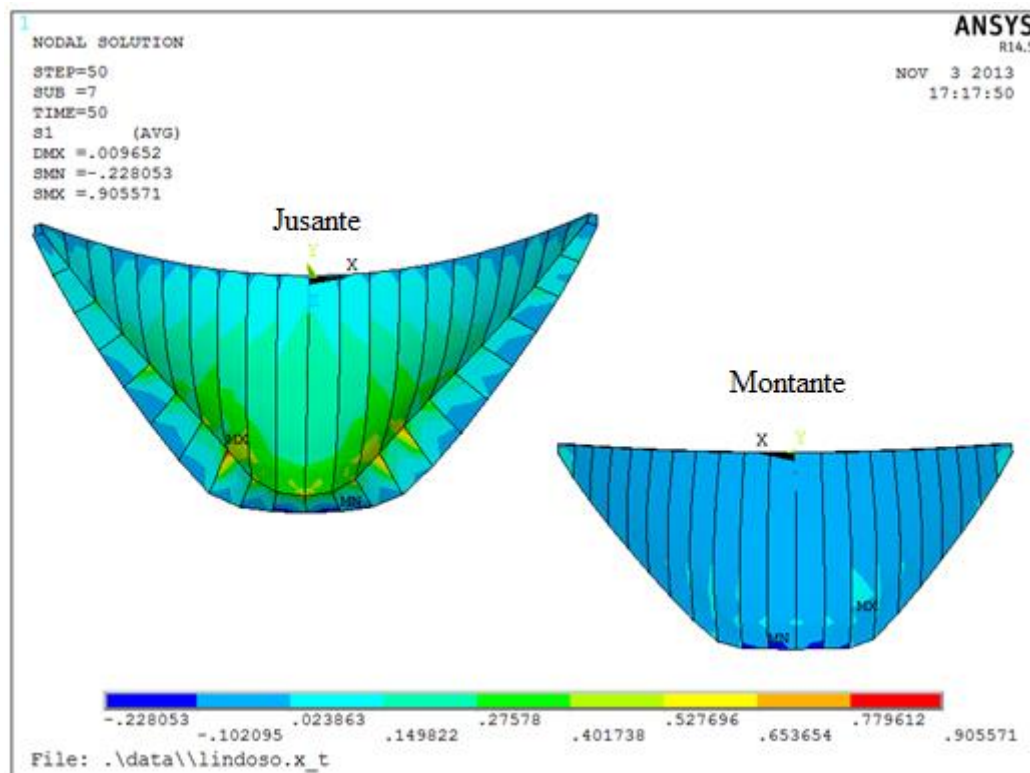


Fig. 93 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à estratégia de injeção 5 (MPa)

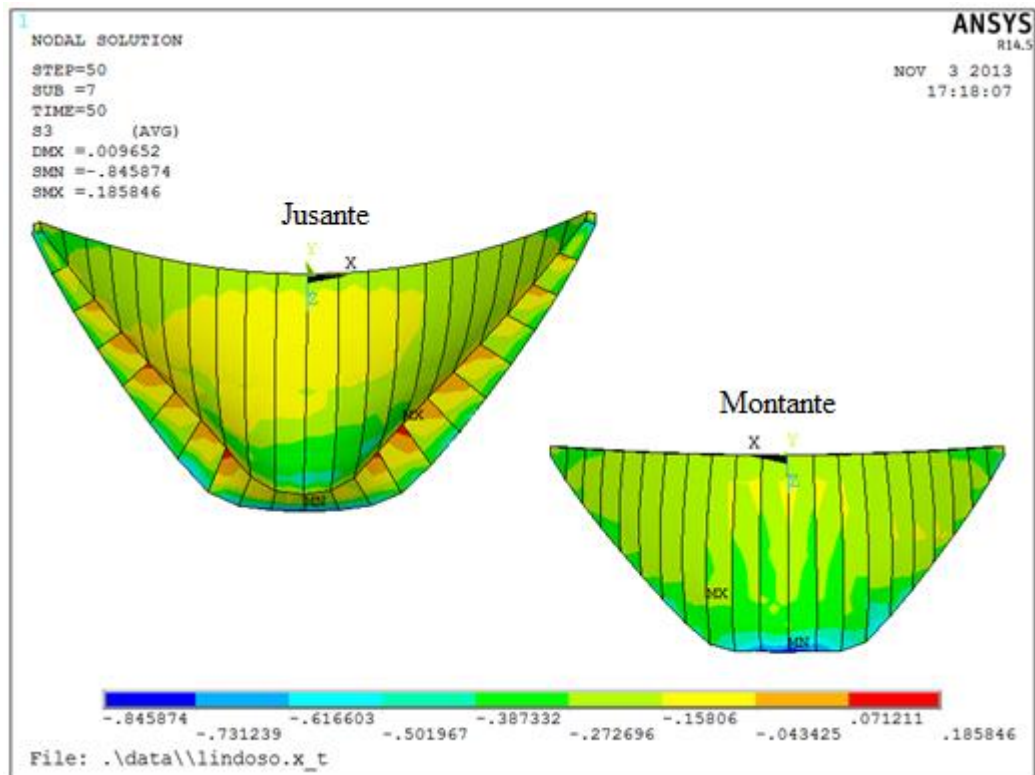


Fig. 94 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à estratégia de injeção 5 (MPa)

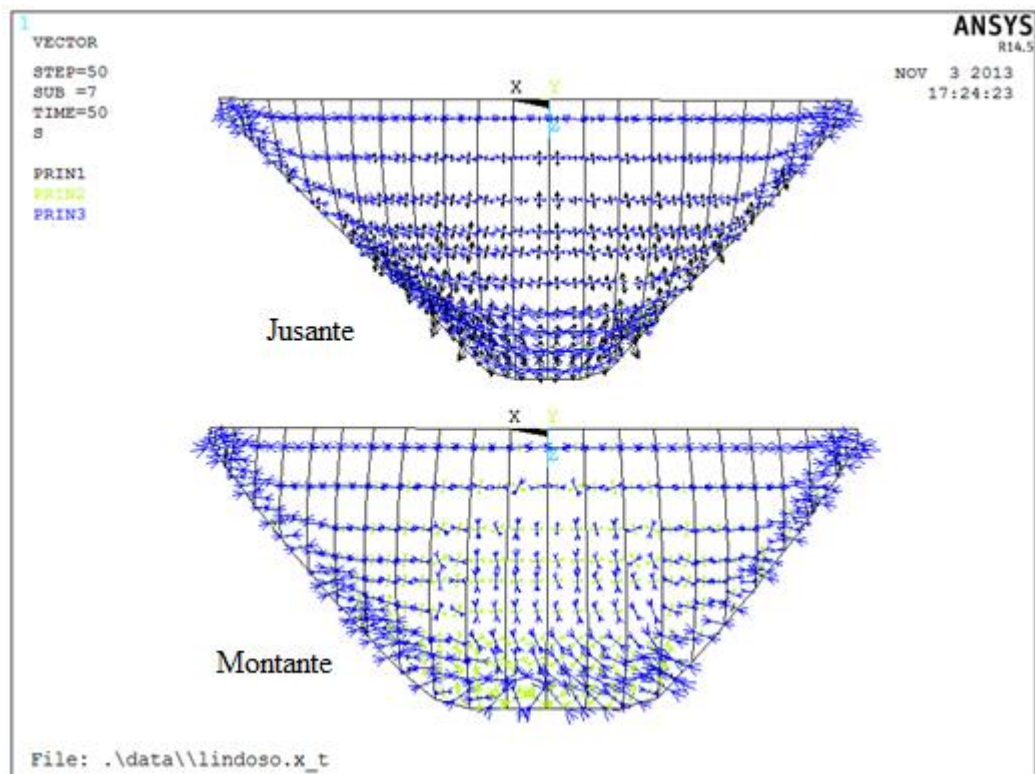


Fig. 95 – Direção das tensões principais no paramento de jusante e montante respetivamente, devido à estratégia de injeção 5

7.3.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.3.6.1. Deslocamentos radiais

Como é natural, devido ao processo de injeção das juntas de contração, os blocos da barragem sofrem um deslocamento radial para montante, aumentando gradualmente, à medida que se vai procedendo às injeções das juntas.

No gráfico 4, estão representados os deslocamentos radiais ao longo da junta central para as diferentes estratégias de injeção. Como se constata, a estratégia de injeção 2, possui o maior deslocamento radial das cinco estratégias, destacando-se destas, com um valor no topo da junta central de 15,38 mm em direção a montante. Ao invés, a estratégia 3, é a que apresenta menor valor, 6,99 mm. As restantes estratégias, apresentam deslocamentos idênticos, ao longo da junta central da barragem, como se verifica na tabela 12.

O deslocamento ocorrido na junta central, para a estratégia de injeção 2, diferencia-se bastante das restantes, devido ao facto do seu processo de execução, ser efetuado de forma a injetar em primeiro lugar a junta central na totalidade, seguindo-se as restantes juntas em direção a ambas as margens. Esta metodologia origina um deslocamento inicial de valor elevado.

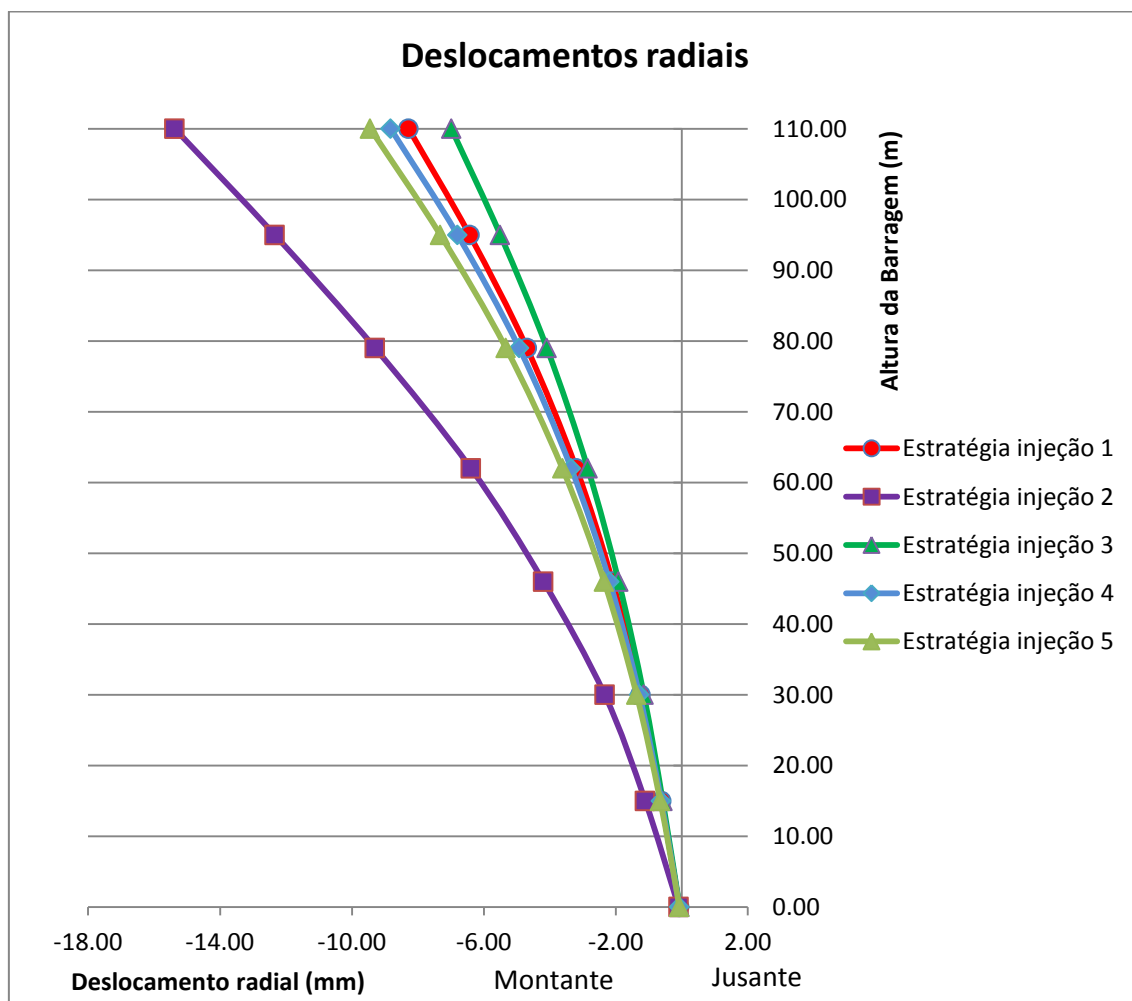


Gráfico 4 – Deslocamento radial da junta central no paramento de montante para as cinco estratégias de injeção.

		Estratégia injeção 1	Estratégia injeção 2	Estratégia injeção 3	Estratégia injeção 4	Estratégia injeção 5
Cotas dos patamares (m)	110.00	-8.28	-15.38	-6.99	-8.83	-9.45
	95.00	-6.44	-12.34	-5.50	-6.80	-7.32
	79.00	-4.70	-9.30	-4.09	-4.93	-5.33
	62.00	-3.20	-6.40	-2.85	-3.35	-3.62
	46.00	-2.10	-4.19	-1.91	-2.19	-2.36
	30.00	-1.25	-2.34	-1.15	-1.29	-1.37
	15.00	-0.62	-1.11	-0.58	-0.62	-0.65
	0.00	-0.07	-0.09	-0.07	-0.07	-0.07

Tabela 12 – Deslocamentos radiais da junta central para as cinco estratégias de injeção.

7.3.6.2. Abertura da junta central da barragem

Analisando o gráfico 5, verifica-se que à medida que se vão injectando os compartimentos da junta central, a sua abertura vai aumentando.

Na estratégia de injeção 1, os deslocamentos dos bordos da junta central têm a direcção da margem direita da barragem. Isto deve-se ao facto do processo de injeção das juntas ter sido realizado da margem esquerda em direcção à margem direita.

Na estratégia 2, são apresentados os valores mais elevados das cinco estratégias de injeção. Este facto é justificado por se proceder à injeção de cada junta na sua totalidade, iniciando-se na junta central e prosseguindo-se em direcção a ambas as margens.

Na estratégia 3 são obtidos os menores valores das cinco estratégias, para a abertura da junta central. Este resultado já era esperado, visto que se inicia a injeção dos compartimentos de ambas as margens em direcção aos compartimentos localizados na junta central, e como tal, devido às pressões nos compartimentos, os blocos vão se inclinando ligeiramente em direcção à zona de fecho, visto que na direcção contrária os compartimentos já estão injectados. Assim, devido a esta ligeira inclinação dos blocos no instante anterior à injeção do último compartimento em cada nível (na junta central), a abertura final da junta será menor.

Nas estratégias 4 e 5 apresentam uma abertura da junta semelhante. Através dos gráficos verifica-se, para estas estratégias, uma simetria de abertura de junta, que advém do processo de injeção simultâneo dos compartimentos simétricos em relação à junta central. Estas estratégias de injeção são, usualmente, as mais utilizadas.

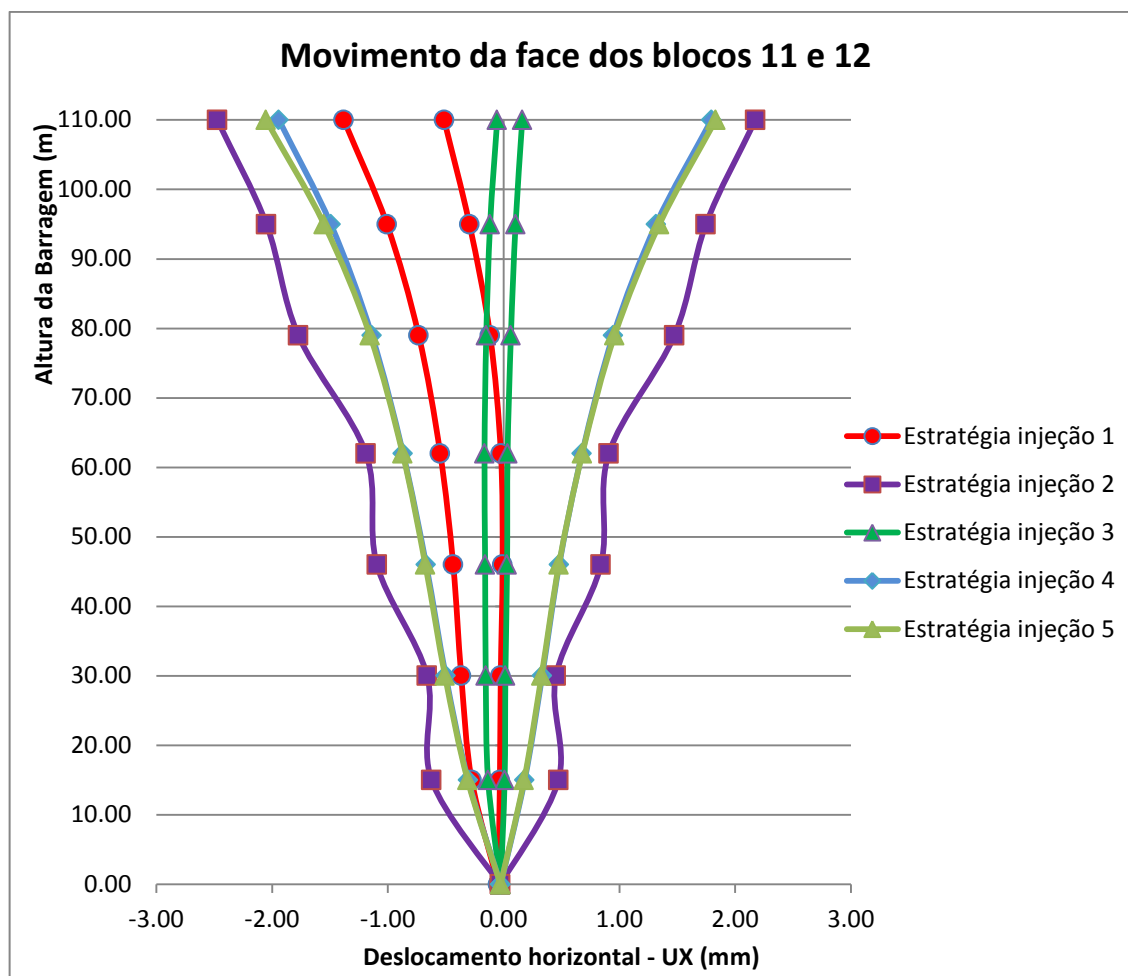


Gráfico 5 - Movimento das faces dos blocos 11 e 12 para as cinco estratégias de injeção

		Estratégia injeção 1		Estratégia injeção 2		Estratégia injeção 3		Estratégia injeção 4		Estratégia injeção 5	
		B11	B12	B11	B12	B11	B12	B11	B12	B11	B12
Cotas dos patamares (m)	110.00	-0.51	-1.38	2.17	-2.47	0.16	-0.06	1.79	-1.94	1.83	-2.05
	95.00	-0.30	-1.01	1.75	-2.05	0.10	-0.12	1.32	-1.49	1.35	-1.55
	79.00	-0.12	-0.73	1.48	-1.77	0.06	-0.15	0.95	-1.14	0.96	-1.16
	62.00	-0.02	-0.55	0.91	-1.19	0.03	-0.17	0.68	-0.87	0.68	-0.87
	46.00	-0.01	-0.44	0.84	-1.09	0.03	-0.16	0.48	-0.67	0.48	-0.68
	30.00	-0.03	-0.37	0.45	-0.66	0.01	-0.15	0.33	-0.50	0.33	-0.51
	15.00	-0.03	-0.28	0.47	-0.62	0.01	-0.13	0.18	-0.31	0.18	-0.31
	0.00	-0.05	-0.05	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03

Tabela 13 – Movimento das faces dos blocos 11 e 12 para as cinco estratégias de injeção.

Pelo gráfico 6, referente à abertura da junta central da barragem, constata-se que, os valores máximos de abertura da junta para as cinco estratégias, são obtidos para a cota de coroamento da barragem.

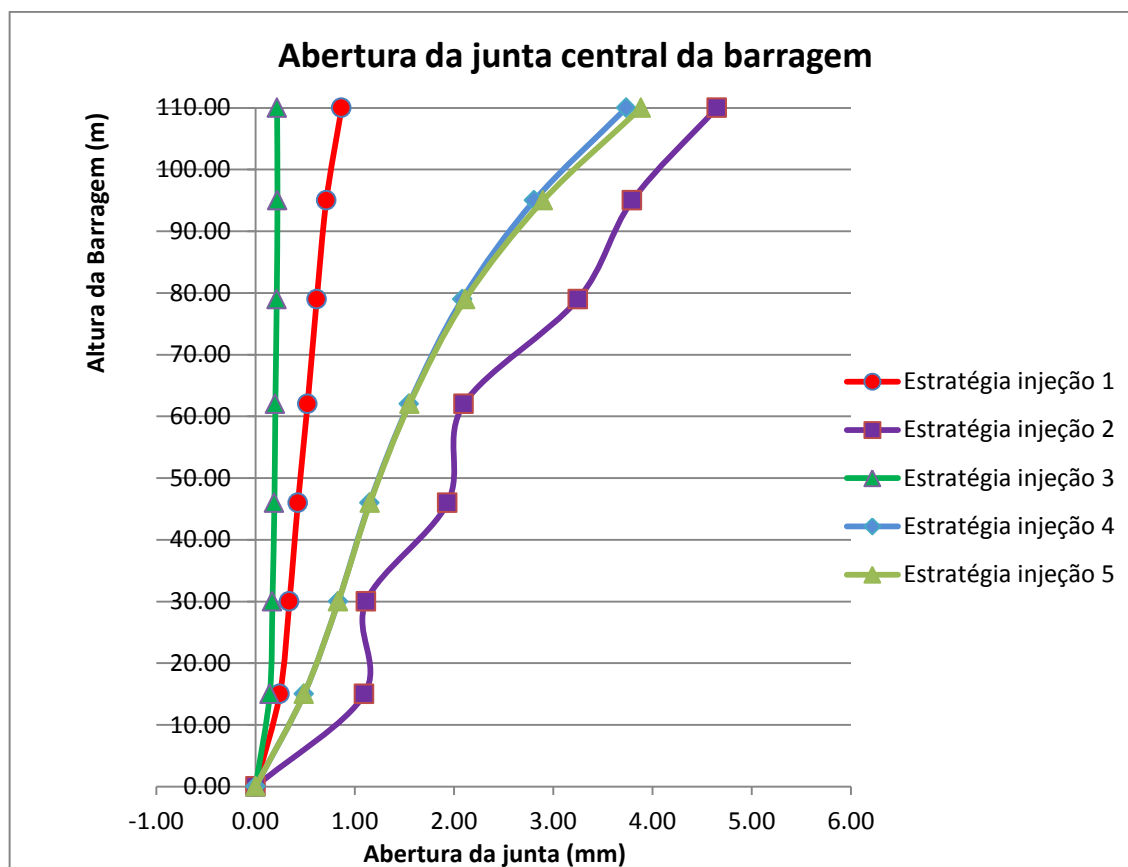


Gráfico 6 - Abertura da junta central no paramento de montante para as cinco estratégias de injeção.

		Estratégia injeção 1	Estratégia injeção 2	Estratégia injeção 3	Estratégia injeção 4	Estratégia injeção 5
Cotas dos patamares (m)	110.00	0.87	4.65	0.22	3.74	3.88
	95.00	0.71	3.80	0.22	2.81	2.90
	79.00	0.62	3.25	0.21	2.08	2.11
	62.00	0.52	2.10	0.20	1.55	1.55
	46.00	0.43	1.93	0.19	1.15	1.15
	30.00	0.34	1.11	0.17	0.83	0.83
	15.00	0.24	1.10	0.14	0.49	0.49
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabela 14 – Abertura da junta central para as cinco estratégias de injeção.

7.3.6.3. Tensões horizontais

As distribuições de tensões na direção dos arcos, ao longo da junta central, no paramento de montante e jusante, são representadas no gráfico 7, respetivamente, podendo-se verificar que, com a exceção da estratégia de injeção 2, todas as outras, apresentam tensões de compressão de valor semelhante, ao longo de toda a junta central. Os resultados obtidos para a estratégia de injeção 2, correspondentes a tensões de tração no paramento de montante, devem ser interpretados como picos de tensão inerentes ao método de cálculo utilizado, devido à aplicação das “constraint equations” ao longo da injeção.

Esta análise foi efetuada essencialmente na junta central, visto se tratar da única junta que apresenta o referencial local coincidente com o referencial global da estrutura, e como tal, representa exactamente o valor das tensões horizontais na direção x.

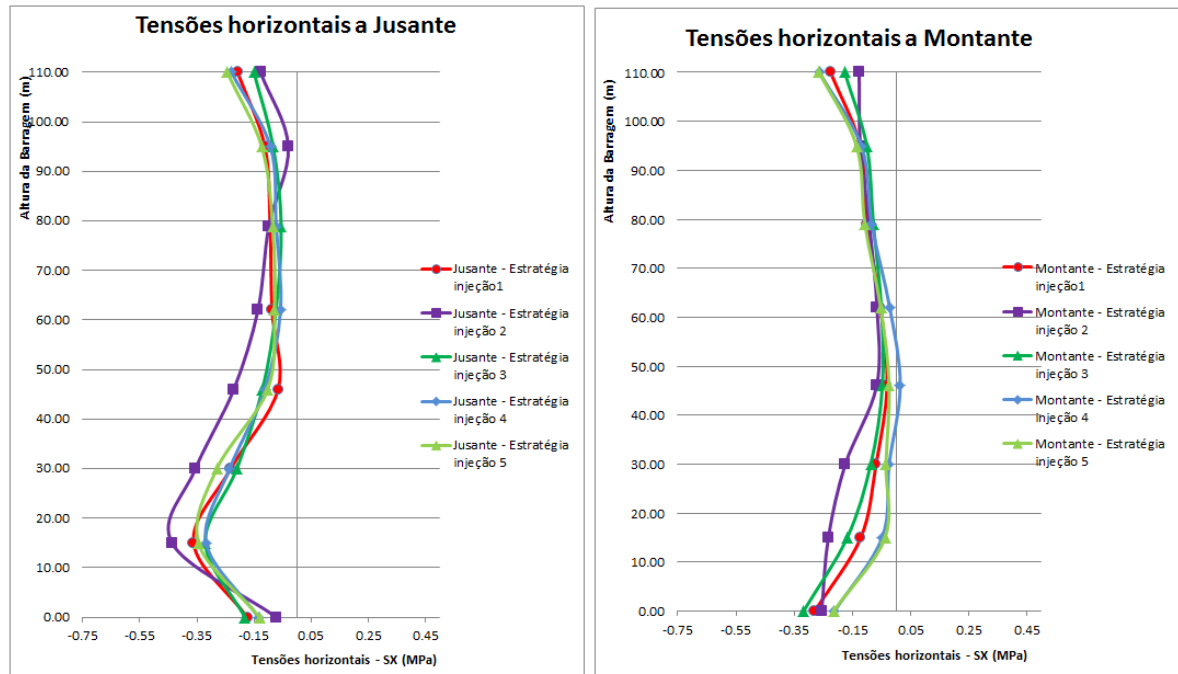


Gráfico 7 - Tensões horizontais (σ_x) ao longo da junta central a jusante e montante da barragem, para as cinco estratégias de injeção (MPa)

		Jusante					Montante				
Estratégia de injeção		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Cotas dos patamares (m)	110.00	-0.208	-0.127	-0.150	-0.229	-0.244	-0.225	-0.127	-0.177	-0.264	-0.264
	95.00	-0.112	-0.030	-0.083	-0.093	-0.123	-0.123	-0.123	-0.101	-0.119	-0.136
	79.00	-0.094	-0.098	-0.055	-0.072	-0.085	-0.100	-0.092	-0.078	-0.084	-0.107
	62.00	-0.087	-0.136	-0.073	-0.057	-0.078	-0.054	-0.066	-0.051	-0.022	-0.053
	46.00	-0.066	-0.221	-0.121	-0.112	-0.102	-0.031	-0.067	-0.047	0.014	-0.024
	30.00	-0.232	-0.355	-0.210	-0.235	-0.280	-0.069	-0.175	-0.087	-0.024	-0.035
	15.00	-0.362	-0.437	-0.321	-0.317	-0.344	-0.121	-0.233	-0.168	-0.048	-0.038
	0.00	-0.173	-0.071	-0.181	-0.134	-0.130	-0.279	-0.256	-0.318	-0.211	-0.215

Tabela 15 – Tensões horizontais (σ_x) ao longo da junta central a jusante e montante da barragem, para as cinco estratégias de injeção (MPa)

7.3.6.4. Tensões principais

Através das figuras relativas às direções das tensões principais e ao gráfico 8, verifica-se, genericamente, em todo o paramento de jusante da barragem, para todas as estratégias de injeção, que, as tensões de tração aumentam à medida que se vai aproximando do maciço de fundação adjacente. A tensão de tração registada ocorre devido à inclinação dos blocos para montante. Relativamente à zona de montante da junta central da barragem, verifica-se que, as tensões de compressão aumentam também em direção à sua base.

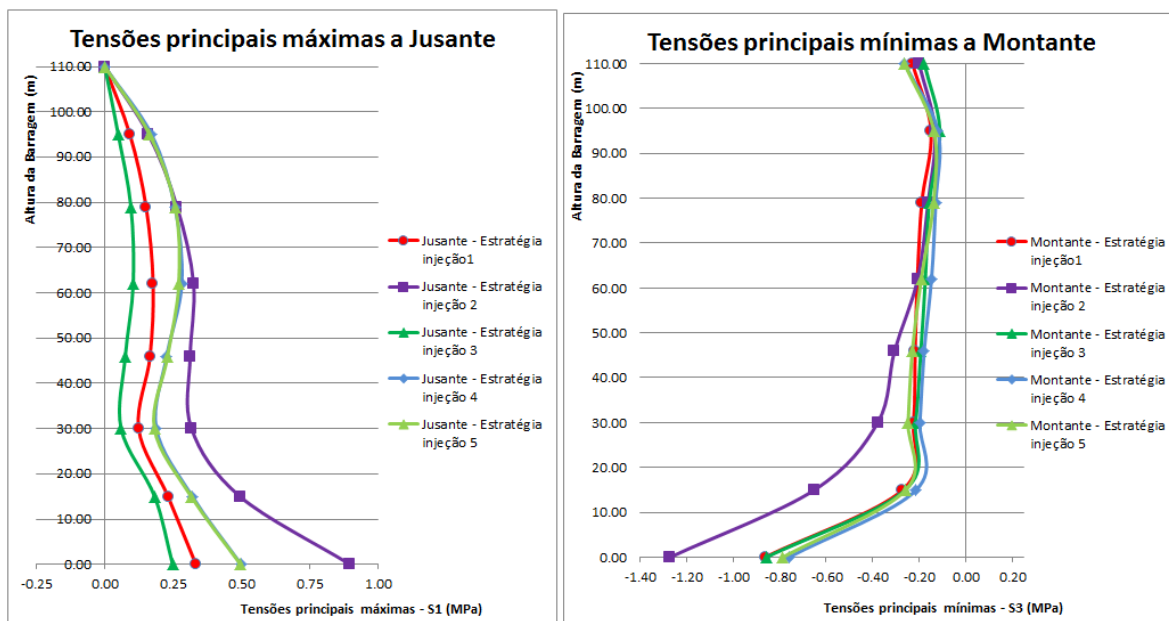


Gráfico 8 - Tensões principais máximas a jusante e mínimas a montante ao longo da junta central da barragem, para as cinco estratégias de injeção (MPa)

		Tensões principais máximas a jusante					Tensões principais mínimas a montante				
Estratégia de injeção		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Cotas dos patamares (m)	110.00	-0.002	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002	-0.229	-0.202	-0.179	-0.264	-0.264
	95.00	0.090	0.158	0.048	0.169	0.162	-0.149	-0.133	-0.112	-0.120	-0.137
	79.00	0.150	0.263	0.094	0.255	0.256	-0.190	-0.163	-0.157	-0.129	-0.139
	62.00	0.175	0.323	0.103	0.280	0.270	-0.208	-0.207	-0.174	-0.148	-0.192
	46.00	0.164	0.311	0.073	0.225	0.228	-0.218	-0.306	-0.193	-0.179	-0.230
	30.00	0.122	0.316	0.058	0.187	0.180	-0.225	-0.379	-0.216	-0.197	-0.248
	15.00	0.230	0.493	0.181	0.319	0.315	-0.272	-0.651	-0.261	-0.213	-0.258
	0.00	0.332	0.896	0.247	0.497	0.495	-0.864	-1.272	-0.859	-0.761	-0.787

Tabela 16 – Tensões principais máximas (σ_1) ao longo da junta central a jusante e montante da barragem, para as cinco estratégias de injeção (MPa)

7.3.6.5. Considerações finais das estratégias de injeção

De acordo com os resultados obtidos com o modelo desenvolvido e para as hipóteses assumidas, conclui-se que, a estratégia de injeção 3, foi a que apresenta melhores resultados.

Com base nos gráficos e figuras analisadas, constata-se que, esta estratégia é a que apresenta menor valor das tensões de tração na base da barragem na seção de jusante (0,25 MPa), podendo-se salientar que este valor é aproximadamente $\frac{3}{4}$ das tensões de tração da estratégia 1, $\frac{1}{4}$ das tensões de tração da estratégia 2 e $\frac{1}{2}$ das tensões de tração das estratégias 4 e 5. As tensões de compressão são idênticas às tensões das restantes estratégias, no paramento de montante.

Relativamente ao efeito de arco, esta estratégia, apresenta valores semelhantes às outras estratégias de injeção, e como tal, neste tópico não ocorre um efeito diferenciador entre elas.

Pelo gráfico 4, que representa os deslocamentos radiais, verifica-se que esta estratégia é a que possui o menor valor dos deslocamentos obtidos no topo da junta central da barragem (seção do coroamento), 6,99 mm.

Para as hipóteses assumidas, nomeadamente as relativas aos valores da pressão de injeção, este estudo evidenciou que, a estratégia de injeção usualmente utilizada em barragens abóbada não foi a que apresentou melhores resultados.

A análise das combinações de ações, envolvendo o peso próprio e a pressão hidrostática, será efetuada utilizando a estratégia de injeção 3.

7.4. PRESSÃO HIDROSTÁTICA

É admitido para a água da albufeira o peso específico de 10 kN/m³.

A pressão hidrostática varia consoante a altura da água, sendo definida para um determinado nó de um elemento por

$$P = \gamma \times h \quad (7.1)$$

em que, P representa a pressão hidrostática (kPa), γ é o peso específico (kN/m³) e h é a altura da água acima da cota do nó em estudo (m).

Os resultados seguintes foram obtidos, considerando apenas a ação da pressão hidrostática, para diferentes níveis de enchimento da albufeira.

7.4.1. ALBUFEIRA EM NME (51 M)

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados da pressão hidrostática para o NmE da albufeira.

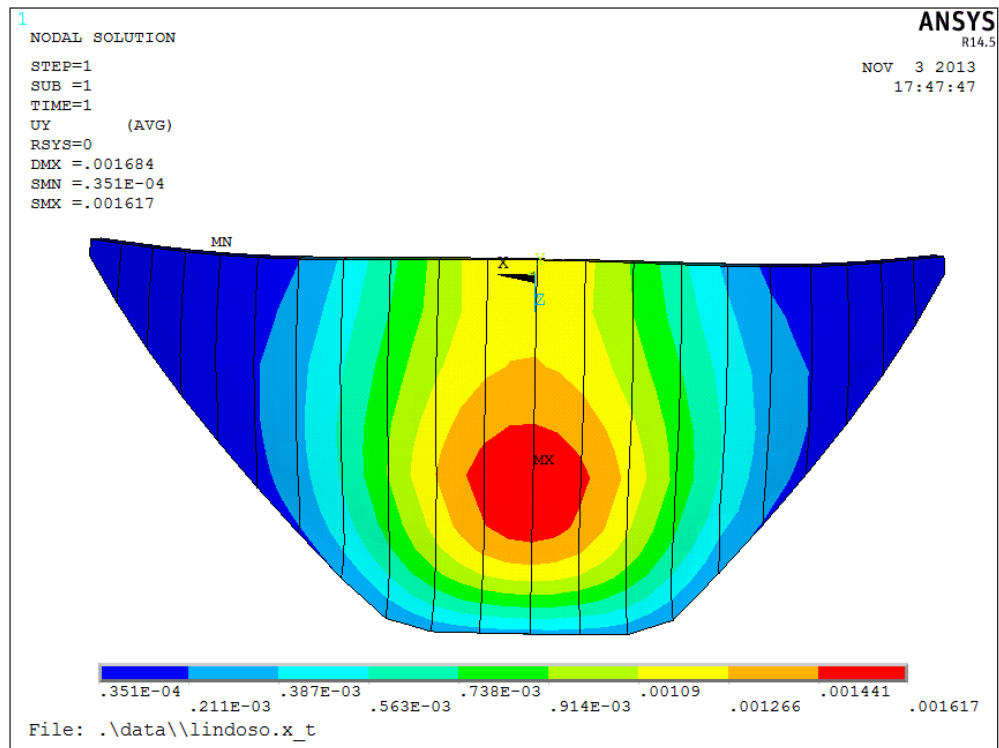


Fig. 96 – Deslocamento radial devido à ação da pressão hidrostática com albufeira NmE (m)

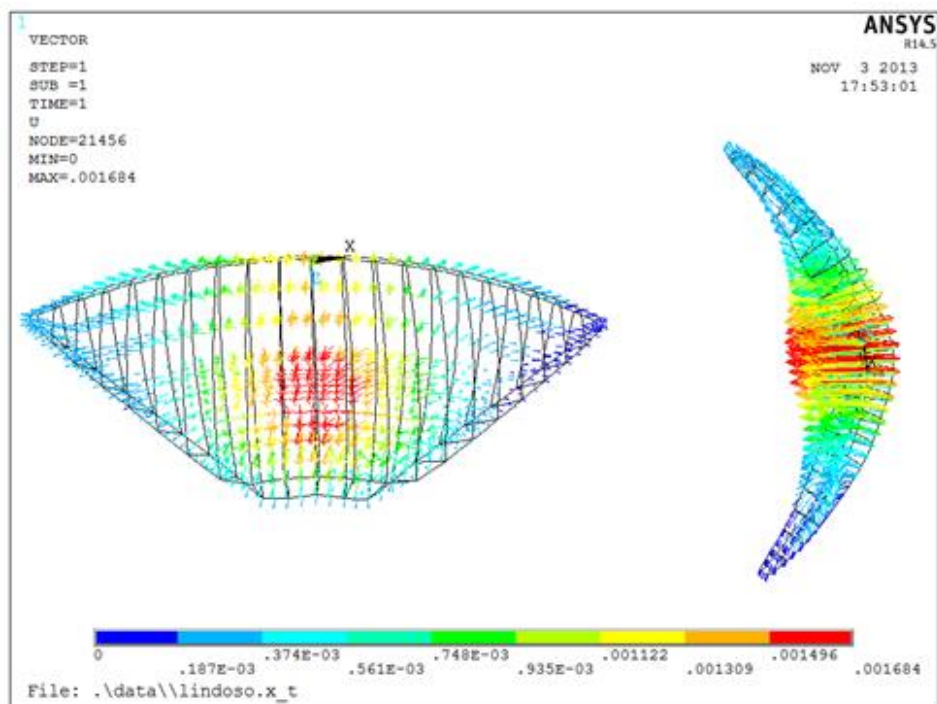


Fig. 97 – Vetores de deslocamentos devido à ação da pressão hidrostática com albufeira NmE (m)

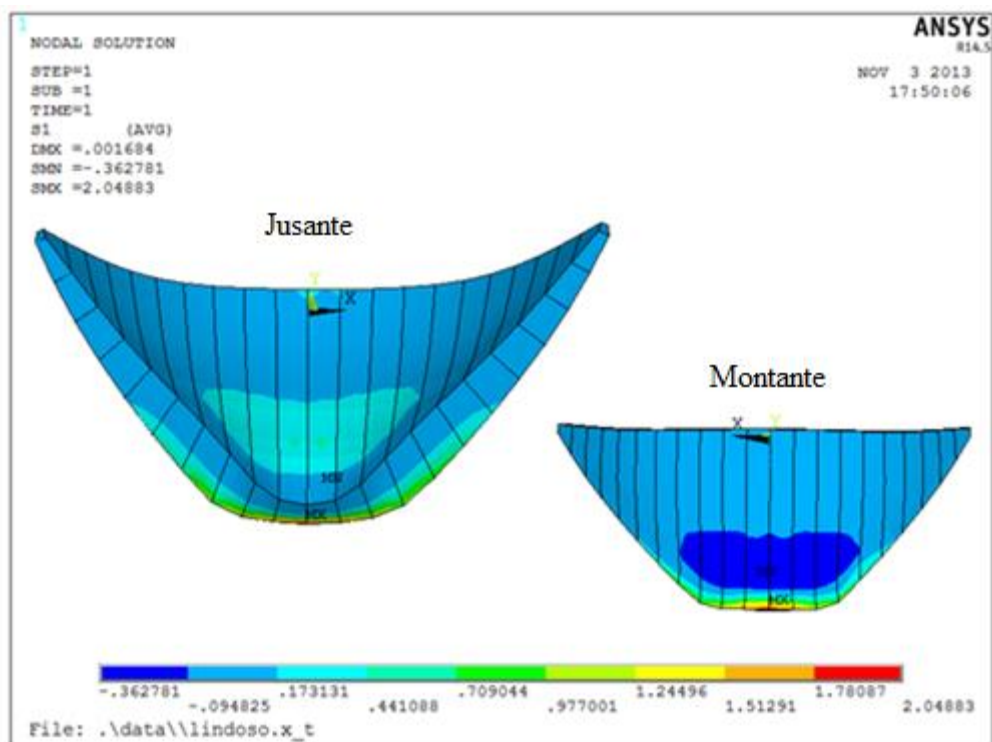


Fig. 98 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à ação da pressão hidrostática com albufera NmE (MPa)

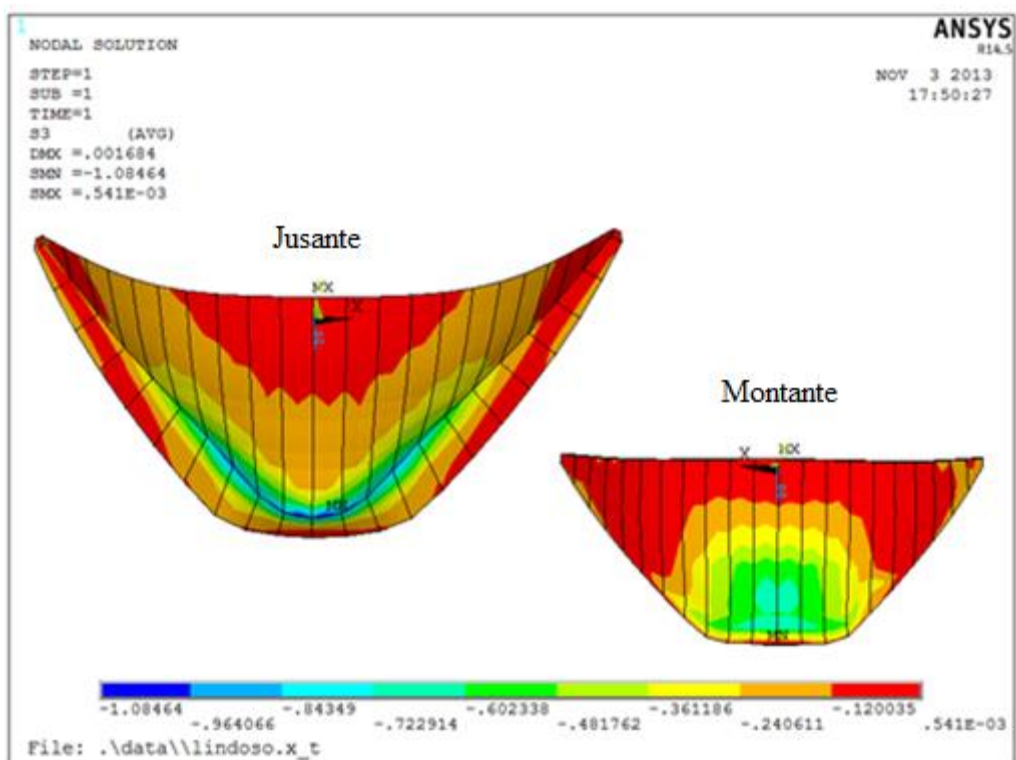


Fig. 99 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à ação da pressão hidrostática com albufera NmE (MPa)

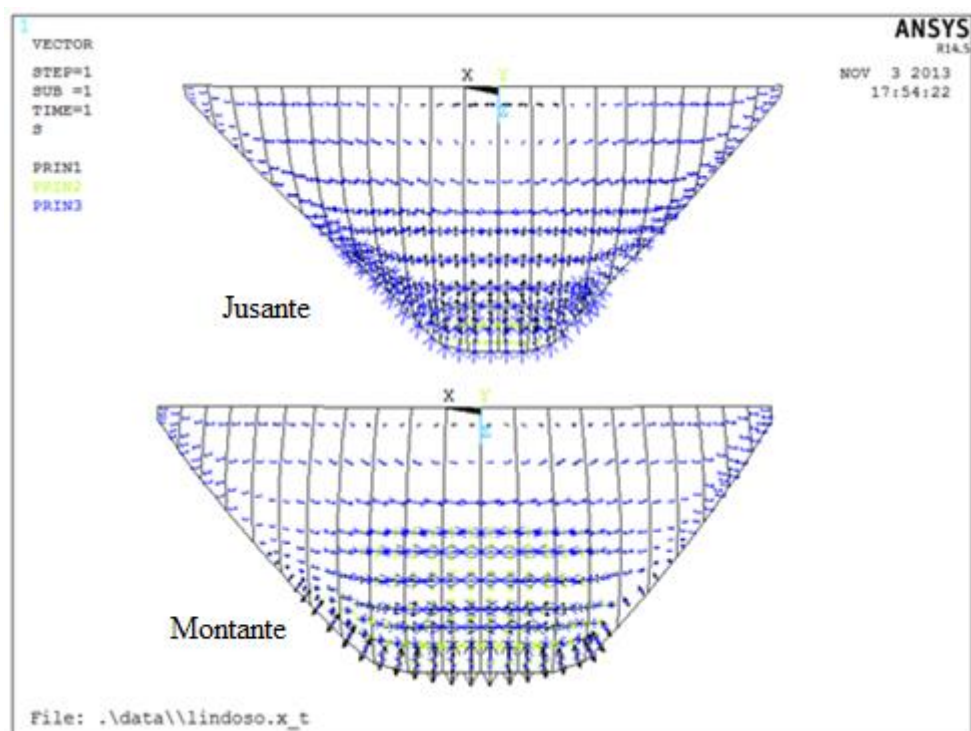


Fig. 100 – Direção das tensões principais no paramento de montante e jusante respetivamente, devido à ação da pressão hidrostática com albufeira NmE

7.4.2. ALBUFEIRA EM NPA (109 M)

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados da pressão hidrostática para o NPA da albufeira.

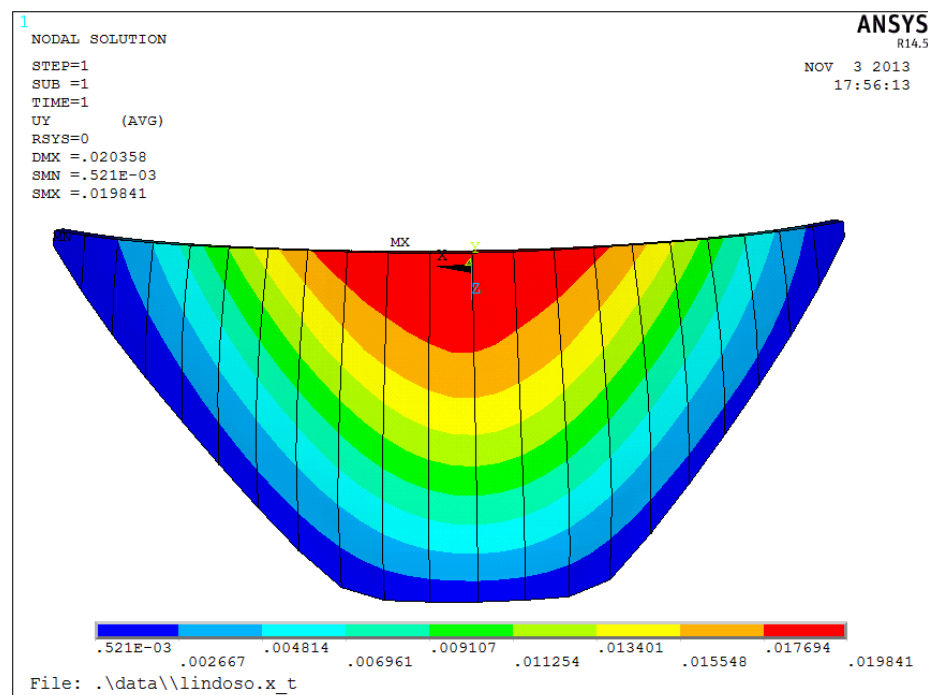


Fig. 101 – Deslocamento radial devido à ação da pressão hidrostática com albufeira NPA (m)

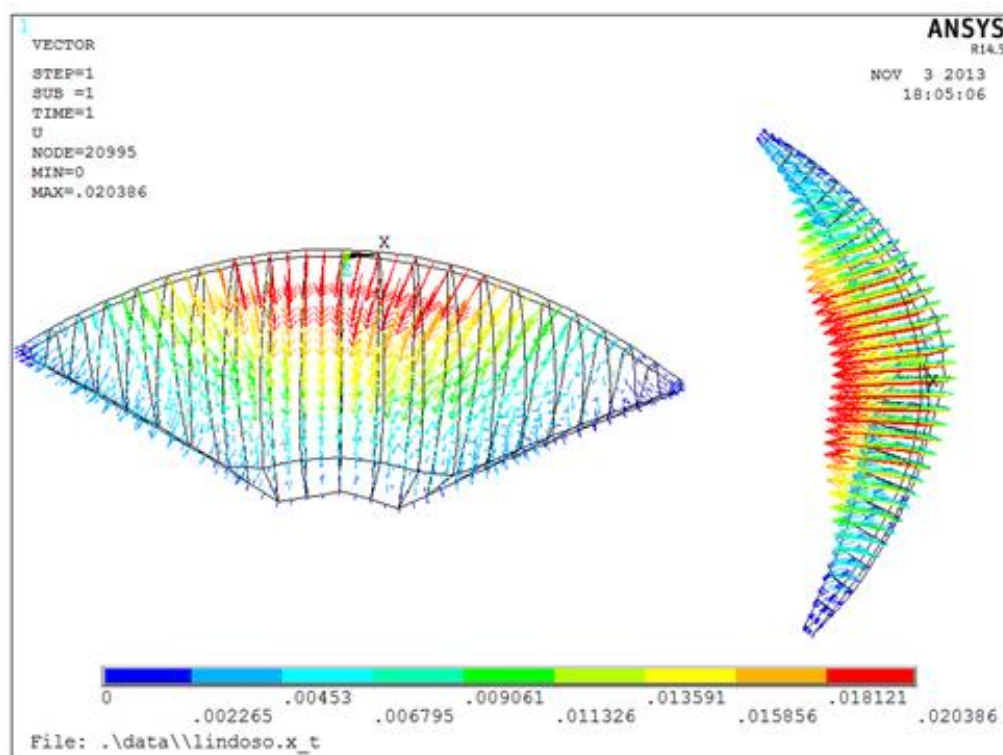


Fig. 102 – Vetores de deslocamentos devido à ação da pressão hidrostática com albufera NPA (m)

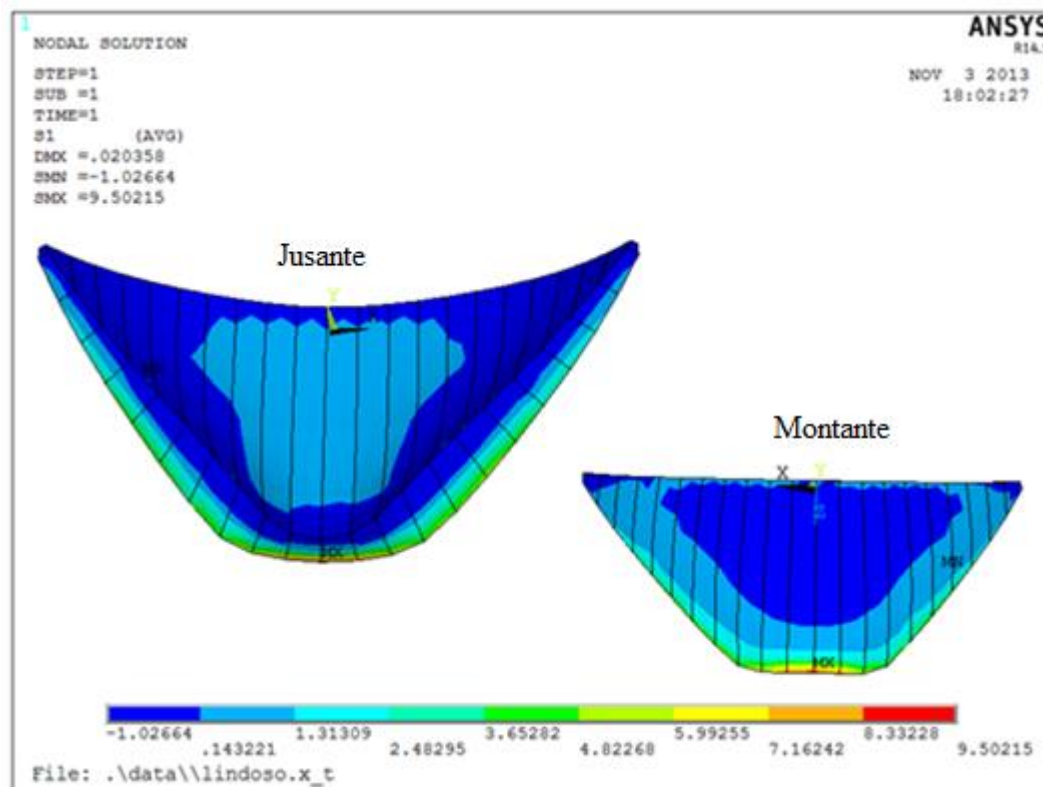


Fig. 103 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à ação da pressão hidrostática com albufera NPA (MPa)

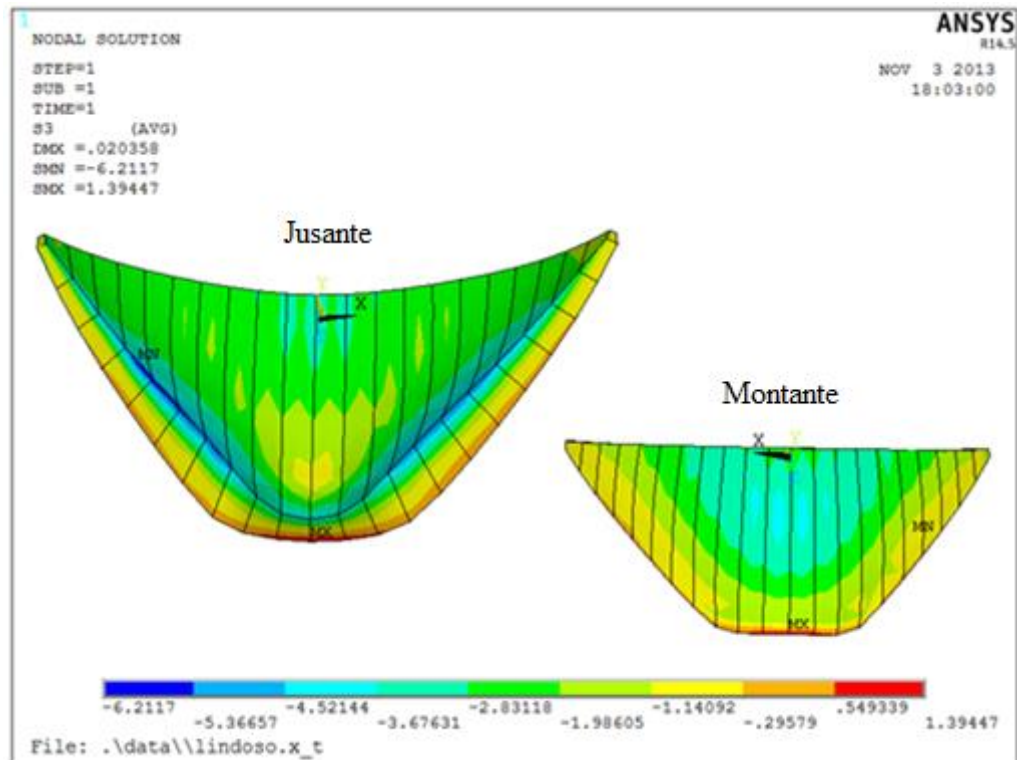


Fig. 104 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à ação da pressão hidrostática com albufera NPA (MPa)

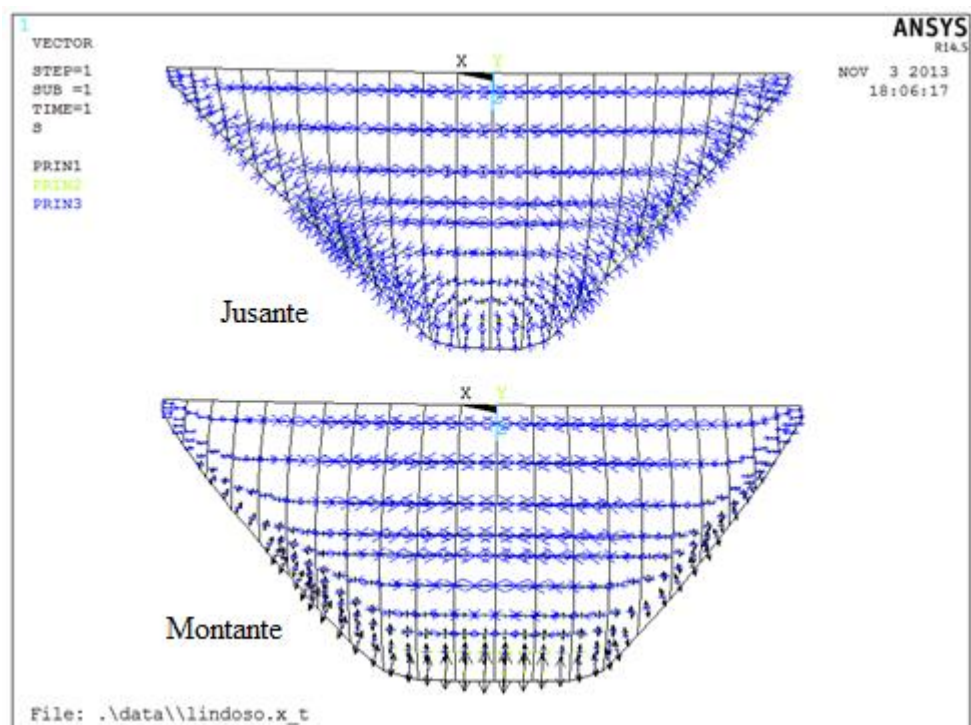


Fig. 105 – Direção das tensões principais no paramento de montante e jusante respetivamente, devido à ação da pressão hidrostática com albufera NPA

7.4.3. ALBUFEIRA EM NMC (110 M)

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados da pressão hidrostática para o NMC da albufeira.

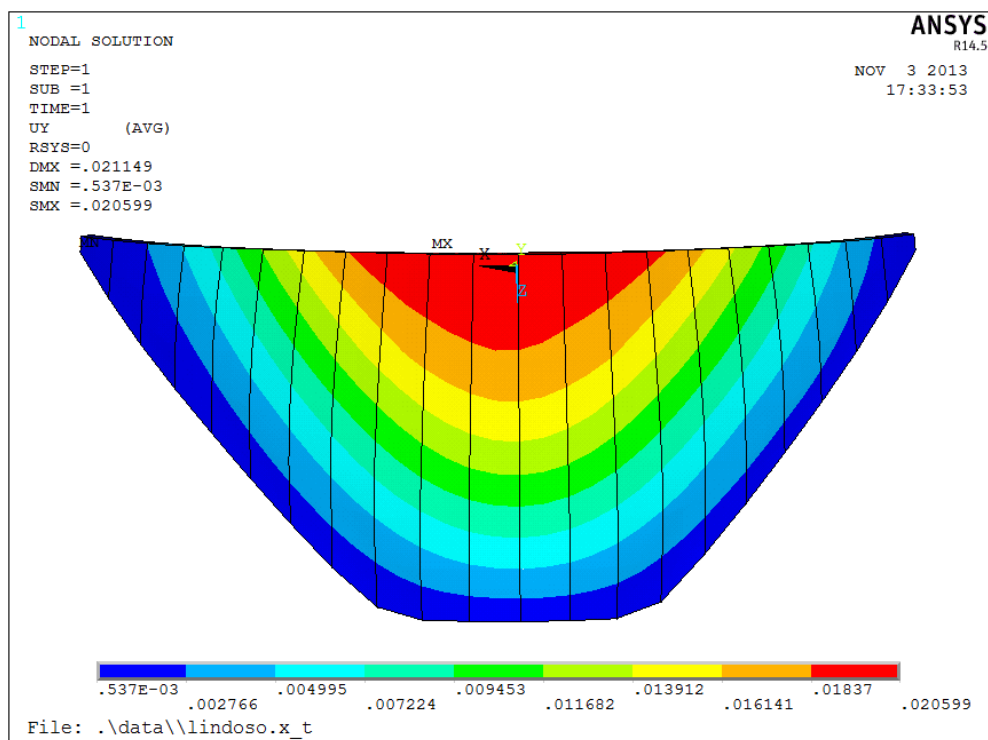


Fig. 106 – Deslocamento radial devido à ação da pressão hidrostática com albufeira NMC (m)

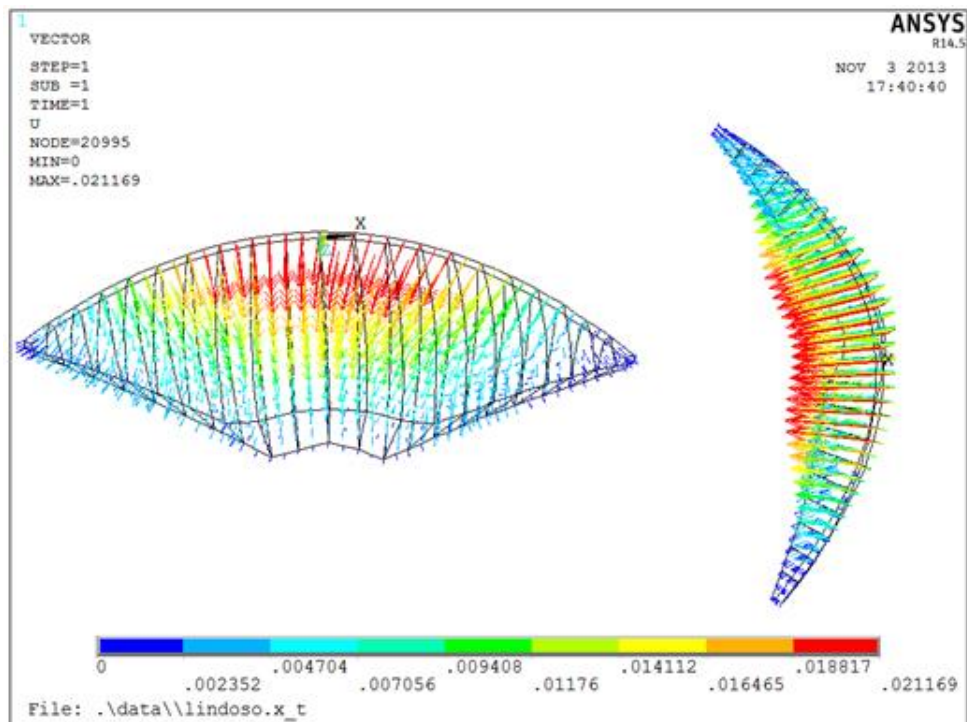


Fig. 107 – Vetores de deslocamentos devido à ação da pressão hidrostática com albufeira NMC (m)

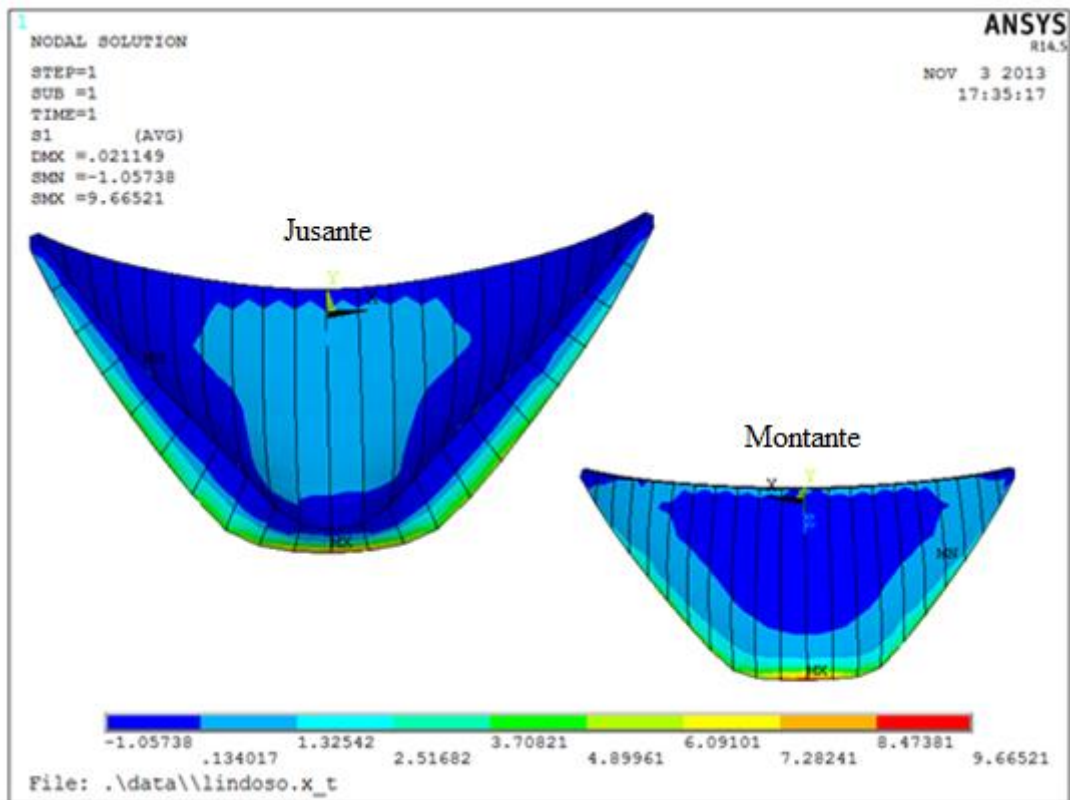


Fig. 108 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à ação da pressão hidrostática com albufera NMC (MPa)

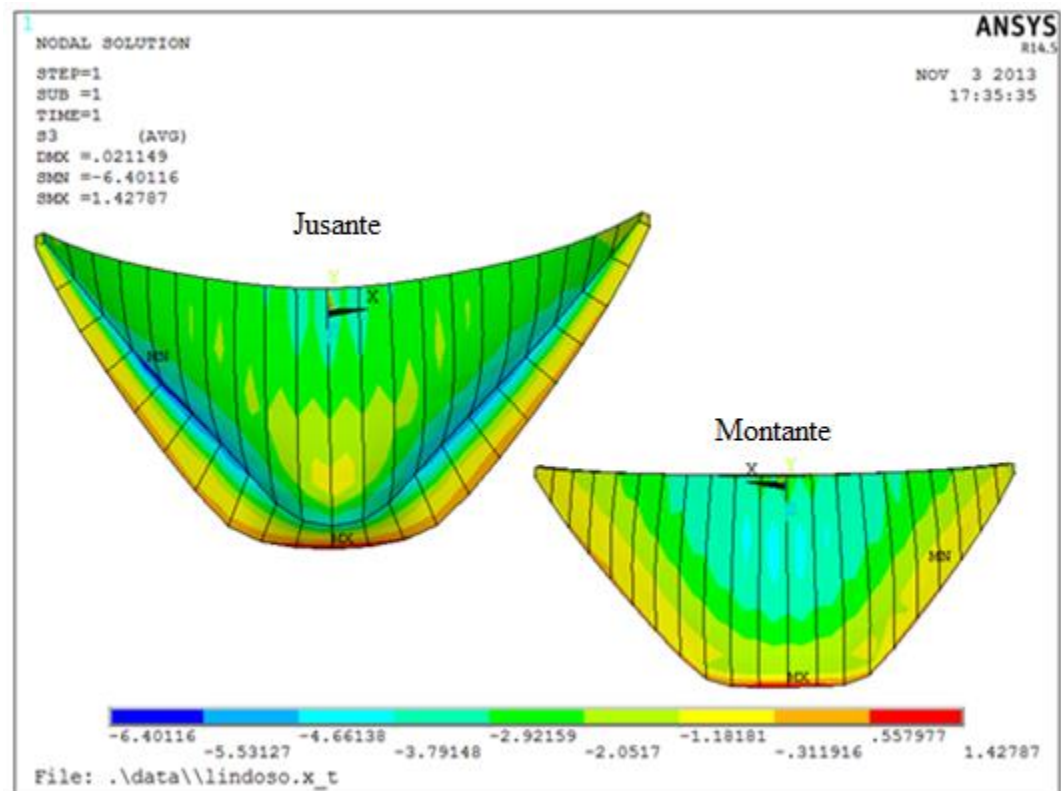


Fig. 109 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à ação da pressão hidrostática com albufera NMC (MPa)

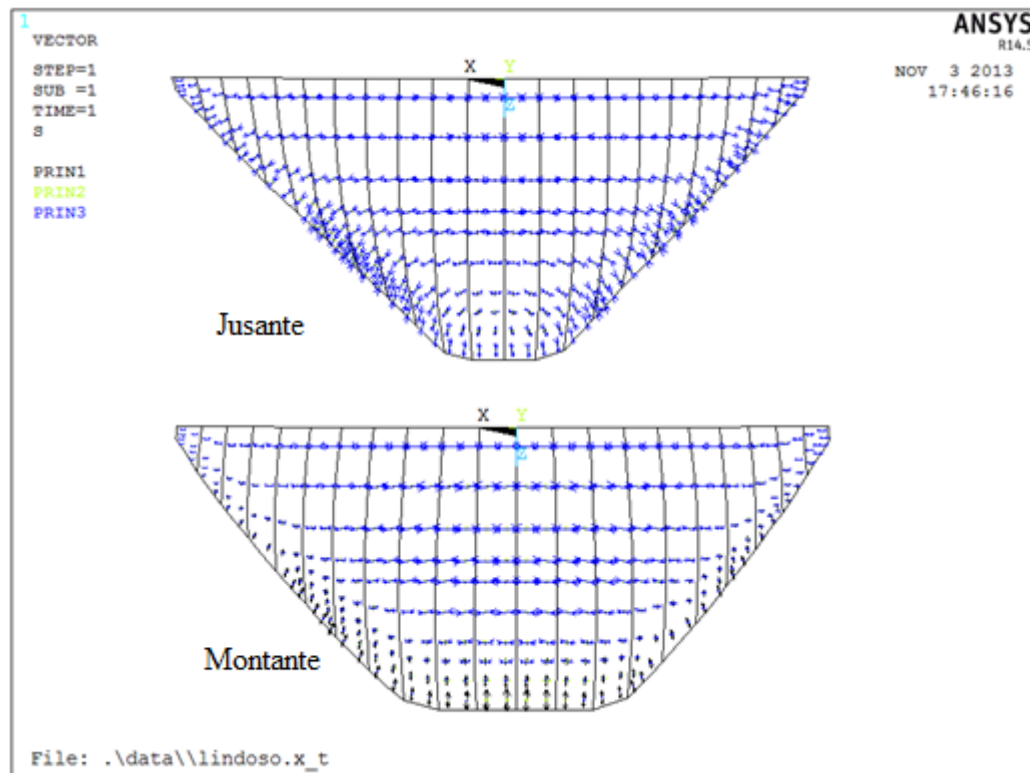


Fig. 110 – Direção das tensões principais no paramento de montante e jusante respectivamente, devido à ação da pressão hidrostática com albufera NMC

7.4.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.4.4.1 Deslocamento radial para diferentes níveis de enchimento da albufera

À medida que se vai procedendo ao enchimento da albufera, os deslocamentos radiais na barragem vão aumentando, registando-se no topo da junta central para o Nível Máximo de Cheia um deslocamento de 19,74 mm.

Como se verifica na figura 111, os valores máximos dos deslocamentos radiais, ocorrem na zona correspondente aos blocos centrais da barragem, nas proximidades da cota de superfície da água em cada instante, sob a forma de num perímetro circular. Nesta figura, estão representadas 9 imagens de resultados, cada um corresponde a um nível de enchimento da albufera:

- 1) Albufera com 16,5 metros de altura de água
- 2) Albufera com 35 metros de altura de água
- 3) Albufera com 51 metros de altura de água (NmE)
- 4) Albufera com 67 metros de altura de água
- 5) Albufera com 83 metros de altura de água
- 6) Albufera com 99 metros de altura de água
- 7) Albufera com 105 metros de altura de água
- 8) Albufera com 109 metros de altura de água (NPA)
- 9) Albufera com 110 metros de altura de água (NMC)

Quando o nível da albufeira se situa a cotas elevadas, verifica-se que, os deslocamentos radiais máximos tendem a prolongar-se em direção às margens, verificando-se uma ligeira assimetria dos resultados. Esta assimetria de resultados é originada pela assimetria geométrica da estrutura.

De referir que, as escalas das diferentes imagens da figura 111, não são as mesmas. No entanto, a análise da figura pode ser auxiliada pela tabela 17, onde estão indicados os deslocamentos radiais para os diferentes níveis de altura de água na albufeira.

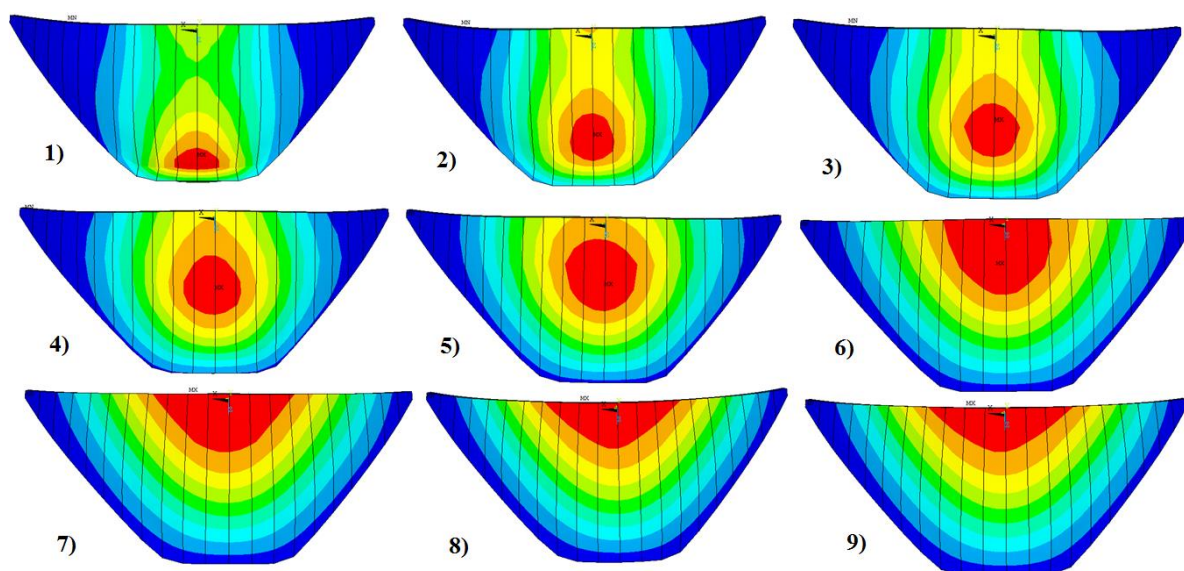


Fig. 111 – Deslocamentos radiais para diferentes níveis de enchimento da albufeira

	Cota do nível de enchimento da albufeira (m)								
Cota (m)	110	109	105	99	83	67	51	35	16.5
110.00	19.74	19.04	16.23	12.00	5.67	2.82	1.25	0.50	0.07
95.00	19.39	18.79	16.39	12.79	6.36	3.00	1.21	0.46	0.06
79.00	18.21	17.73	15.81	12.93	6.98	3.32	1.28	0.46	0.05
62.00	15.59	15.24	13.85	11.76	7.00	3.60	1.45	0.51	0.06
46.00	12.33	12.09	11.14	9.71	6.29	3.58	1.60	0.58	0.07
30.00	8.59	8.44	7.86	6.98	4.83	3.00	1.53	0.61	0.08
15.00	5.00	4.92	4.62	4.17	3.04	2.04	1.18	0.56	0.10
0.00	1.04	1.03	0.97	0.90	0.70	0.50	0.32	0.17	0.04

Tabela 17 - Deslocamentos radiais da consola de fecho para diferentes níveis de enchimento da albufeira (mm)

Na figura 112, é representada a evolução dos deslocamentos radiais, observados na base de coordenómetro do fio de prumo PP3, situado à cota 336,0m, correspondentes ao valores calculados que constam no relatório de “Observação da Barragem do Alto Lindoso durante o primeiro enchimento da albufeira”. O comportamento estrutural da Barragem do Alto Lindoso foi interpretado com o auxílio de modelos matemáticos, e analisado pelo método dos elementos finitos por parte do LNEC e da EDP.

Os resultados obtidos na figura 112 são referentes ao modelo desenvolvido pelo LNEC, que é constituído por 44 elementos finitos de casca espessa e 38 elementos de junta (que correspondem às 10 juntas ímpares entre os blocos), que se apoiam elasticamente na fundação. Este modelo apresenta uma malha com 506 pontos nodais. (Ramos, J.M., et al., 1994).

Através desta figura é possível obter os valores dos deslocamentos radiais das cinco curvas expostas (valores de observação, valores calculados da ação isolada da pressão hidrostática, da variação de temperatura e da combinação de ambas, bem como da resposta diferida), para cada nível de água da albufeira (primeira curva da figura).

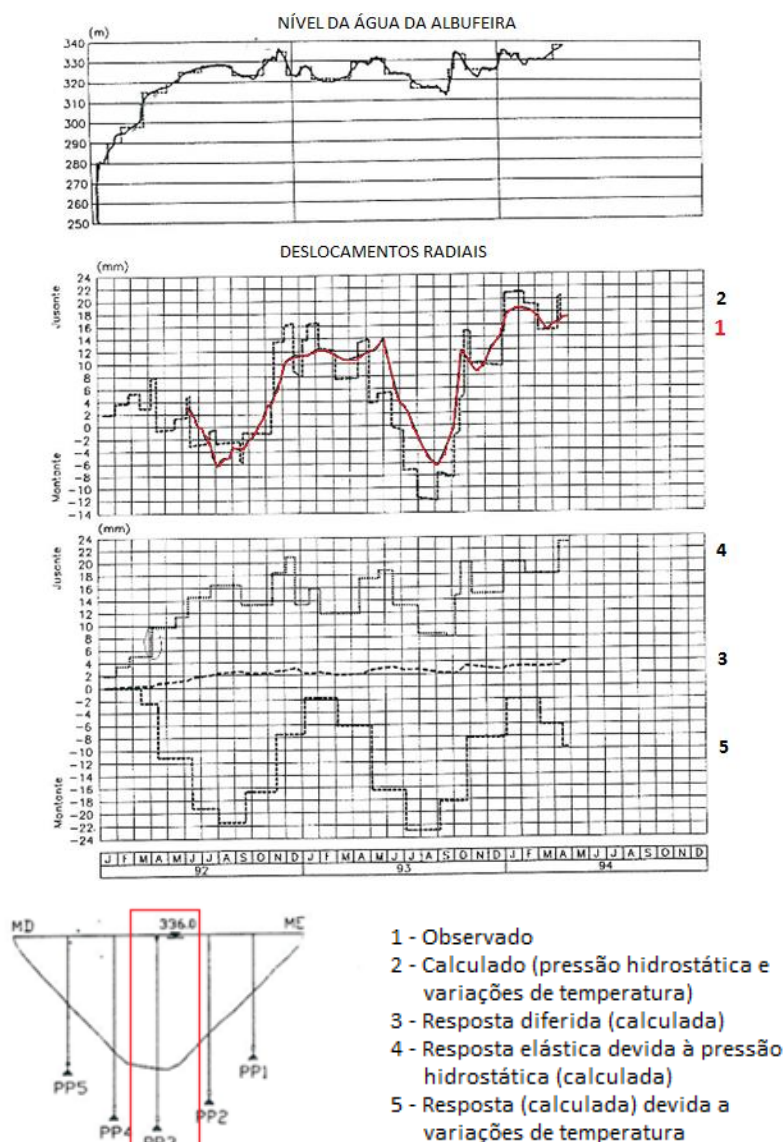


Fig. 112 – Evolução dos deslocamentos radiais observados na base de coordenómetro do fio de prumo PP3 situado à cota 336,0m e correspondentes valores calculados (adaptado de Ramos, J.M., et al., 1994).

No gráfico 9, estão representadas as curvas de influência obtidas para valores dos deslocamentos radiais no topo da junta central para diferentes níveis de enchimento da albufeira. A curva a cor vermelha refere-se ao modelo desenvolvido neste trabalho e a curva a cor verde, é obtida pelos valores

da curva 4 da figura 112, referente à resposta elástica calculada devida à ação isolada da pressão hidrostática, pelo modelo do LNEC. Ambas as curvas apresentam valores de deslocamentos radiais semelhantes, praticamente para todos os níveis de enchimento da albufeira, e como tal, pode-se afirmar que o modelo desenvolvido neste trabalho, traduz uma boa aproximação do modelo desenvolvido pelo LNEC. Pela análise gráfica é possível salientar que para os primeiros níveis de água, registam-se pequenos deslocamentos radiais, no entanto, para níveis mais elevados, a inclinação da curva diminui, o que se traduz num aumento significativo do deslocamento.

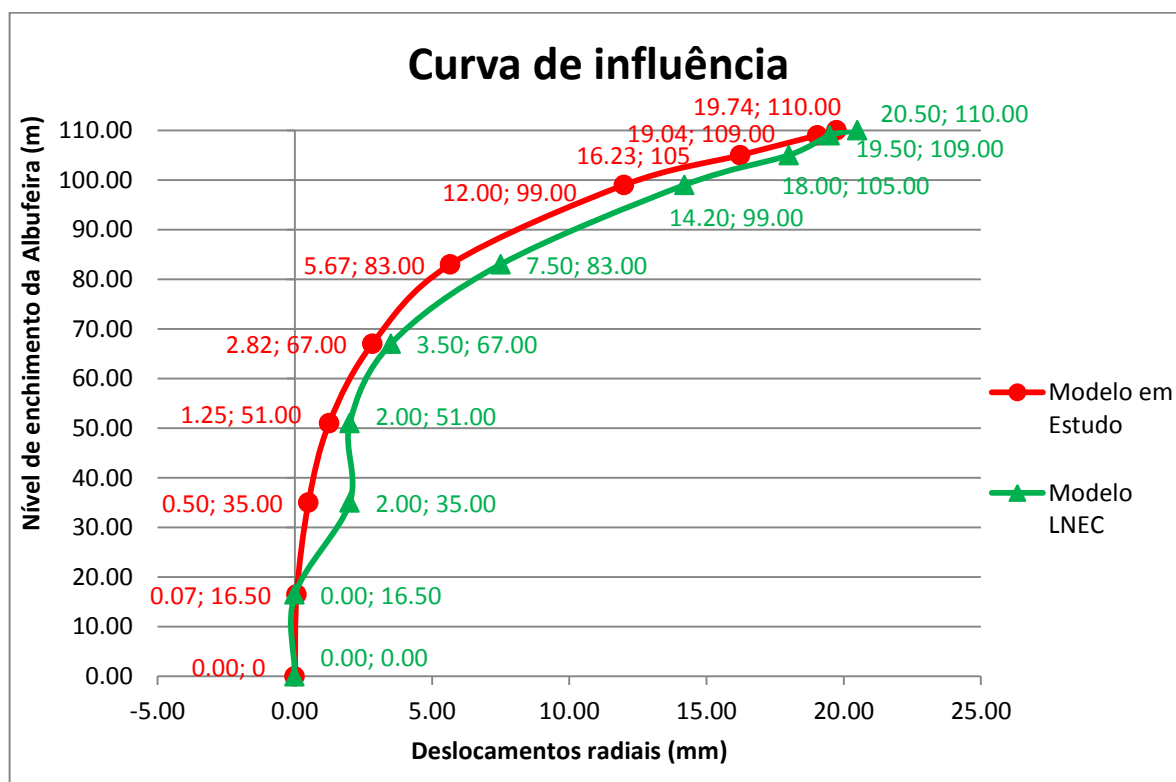


Gráfico 9 - Curvas de influência, no topo da junta central, para diferentes níveis de enchimento da albufeira & deslocamento radial no coroamento

7.4.4.2 Tensões principais

São representadas no gráfico 10 e 11, as tensões principais máximas e mínimas, respetivamente, ao longo da junta central no paramento de montante e jusante da barragem.

Através destes gráficos, e pelas imagens relativas às tensões principais máximas confirma-se a existência de tensões de tração, junto ao pé da barragem, no paramento de montante, de valor muito elevado, atingindo 9,6 MPa aquando do enchimento da albufeira (no Nível Máximo de Cheia), e tensões de compressão no restante paramento da barragem. No entanto, estas tensões de tração devem ser anuladas aquando da combinação desta ação com o peso próprio da estrutura. Situando agora a análise no paramento de jusante, constata-se o aparecimento de trações a partir da cota 15 até à cota do coroamento.

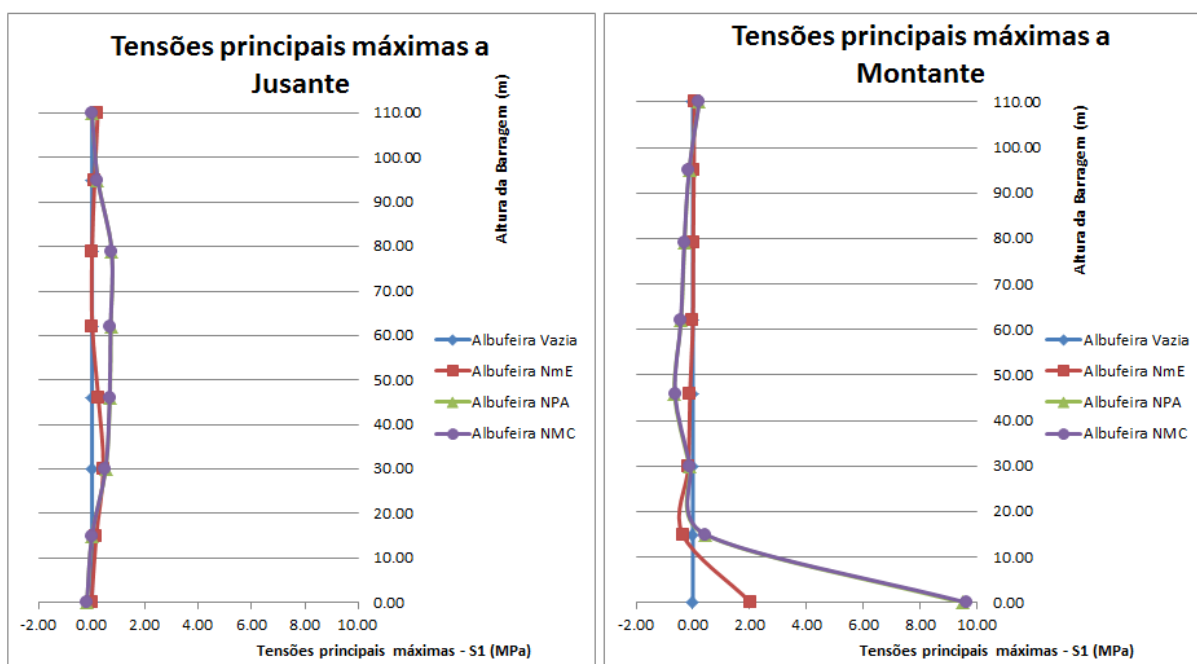


Gráfico 10 - Tensões principais máximas (σ_1) ao longo da junta central devido à ação da pressão hidrostática, para diferentes níveis de enchimento da albufeira (MPa)

		Jusante				Montante			
Albufeira		Vazia	NmE	NPA	NMC	Vazia	NmE	NPA	NMC
Cotas dos patamares (m)	110.00	0.000	0.216	-0.009	-0.010	0.000	0.055	0.224	0.229
	95.00	0.000	0.097	0.216	0.215	0.000	0.035	-0.128	-0.133
	79.00	0.000	0.000	0.740	0.741	0.000	0.017	-0.294	-0.304
	62.00	0.000	0.008	0.705	0.695	0.000	0.003	-0.412	-0.422
	46.00	0.000	0.237	0.670	0.660	0.000	-0.098	-0.644	-0.624
	30.00	0.000	0.423	0.512	0.506	0.000	-0.158	-0.118	-0.093
	15.00	0.000	0.154	-0.005	-0.006	0.000	-0.358	0.423	0.453
	0.00	0.000	-0.025	-0.191	-0.194	0.000	2.048	9.497	9.660

Tabela 18 – Tensões principais máximas (σ_1) ao longo da junta central, no paramento de jusante e montante, devido à ação da pressão hidrostática, para para diferentes níveis de enchimento da albufeira (MPa)

Pelo gráfico 11, para o NMC, as tensões de compressão são máximas na base do paramento de jusante da barragem atingindo valores de -3,8 MPa. Relativamente à análise gráfica efetuada e pela figura 108, a meia altura da zona central da barragem, para o paramento de jusante e montante, ocorrem compressões de valor próximo dos -3 MPa e -3,5 MPa, respetivamente.

Constata-se que acima da cota 20, as tensões principais mínimas são aproximadamente horizontais e abaixo da cota 20, as tensões principais mínimas a jusante e as tensões principais máximas a montante são verticais.

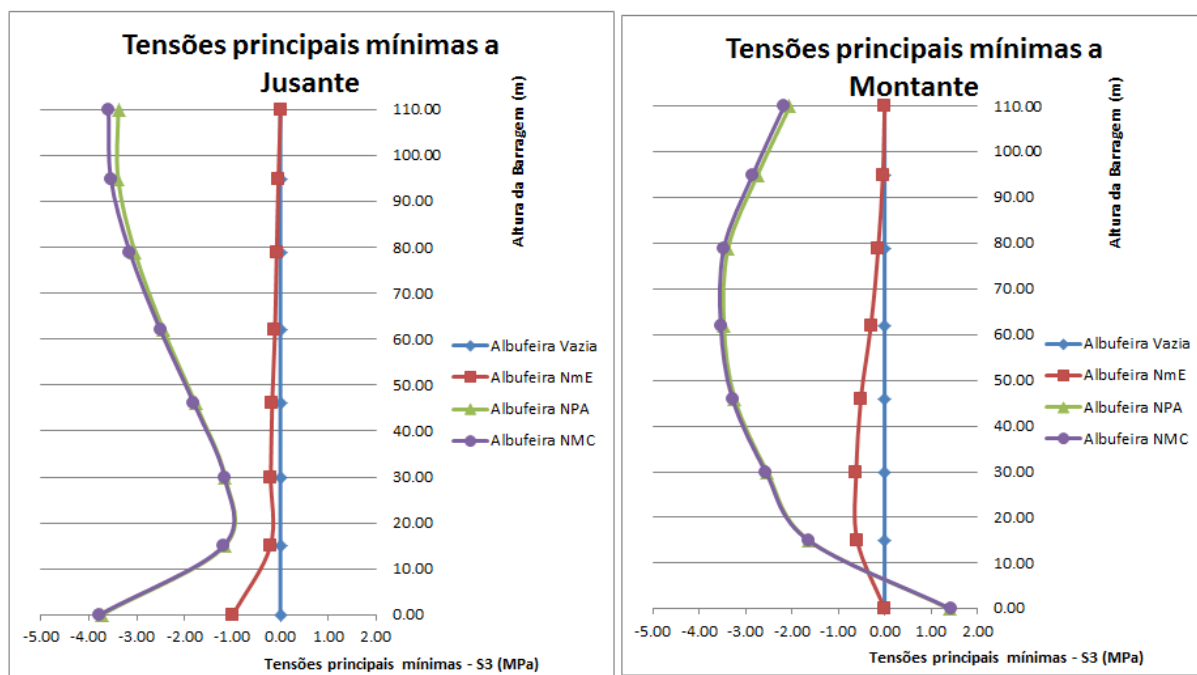


Gráfico 11 - Tensões principais mínimas (σ_3) ao longo da junta central devido à ação da pressão hidrostática, para diferentes níveis de enchimento da albufeira (MPa)

		Jusante				Montante			
Albufeira		Vazia	NmE	NPA	NMC	Vazia	NmE	NPA	NMC
Cotas dos patamares (m)	110.00	0.000	0.000	-3.388	-3.591	0.000	-0.001	-2.047	-2.171
	95.00	0.000	-0.044	-3.393	-3.546	0.000	-0.039	-2.742	-2.848
	79.00	0.000	-0.079	-3.044	-3.148	0.000	-0.139	-3.376	-3.468
	62.00	0.000	-0.115	-2.445	-2.509	0.000	-0.297	-3.465	-3.535
	46.00	0.000	-0.174	-1.774	-1.809	0.000	-0.515	-3.233	-3.284
	30.00	0.000	-0.202	-1.156	-1.172	0.000	-0.612	-2.534	-2.567
	15.00	0.000	-0.211	-1.164	-1.191	0.000	-0.593	-1.629	-1.645
	0.00	0.000	-0.993	-3.741	-3.790	0.000	-0.001	1.394	1.427

Tabela 19 – Tensões principais mínimas (σ_3), no paramento de jusante e montante, ao longo da junta central devido à ação da pressão hidrostática, para diferentes níveis de enchimento da albufeira (MPa)

7.5. ANÁLISE DAS TENSÕES ANTES E DURANTE O ENCHIMENTO DA ALBUFEIRA

7.5.1. TENSÕES INICIAIS ANTES DO ENCHIMENTO DA ALBUFEIRA (COMBINAÇÃO 1)

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados da combinação 1.

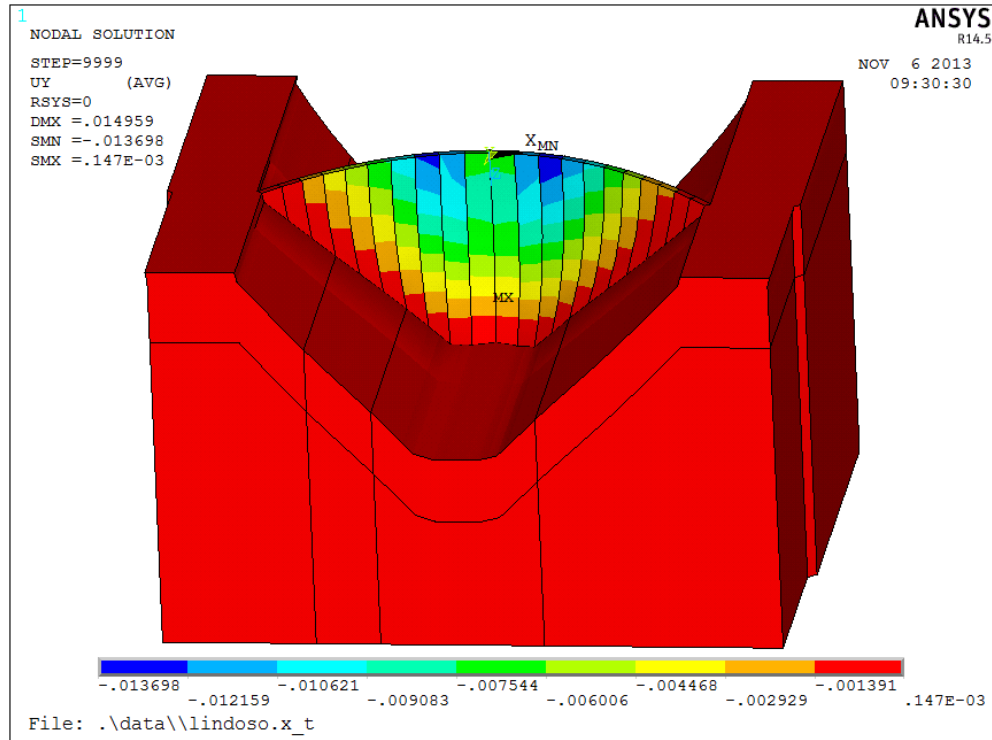


Fig. 113 – Deslocamento radial devido à combinação de ações PP+PI (m)

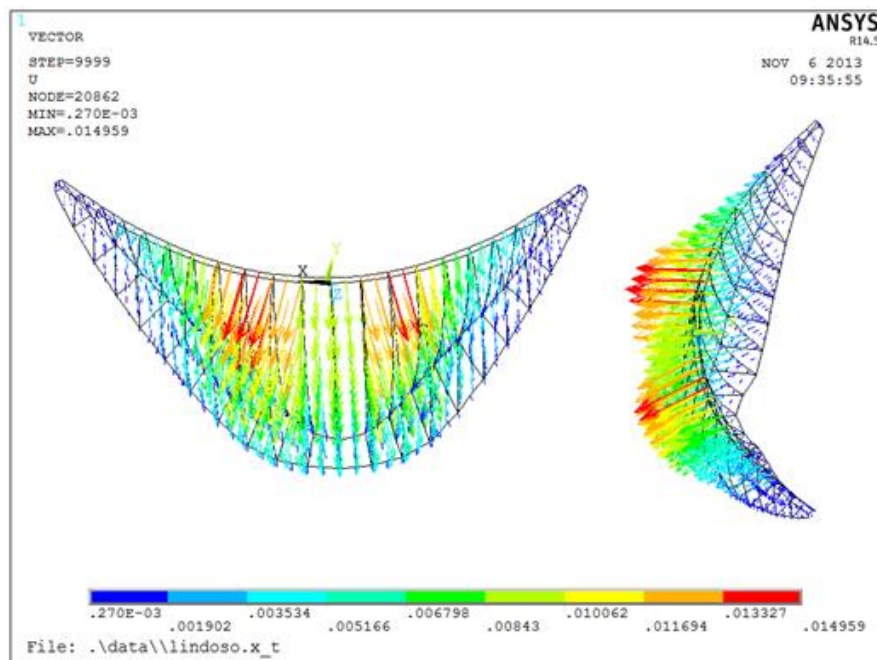


Fig. 114 – Vetores de deslocamentos devido à combinação de ações PP+PI (m)

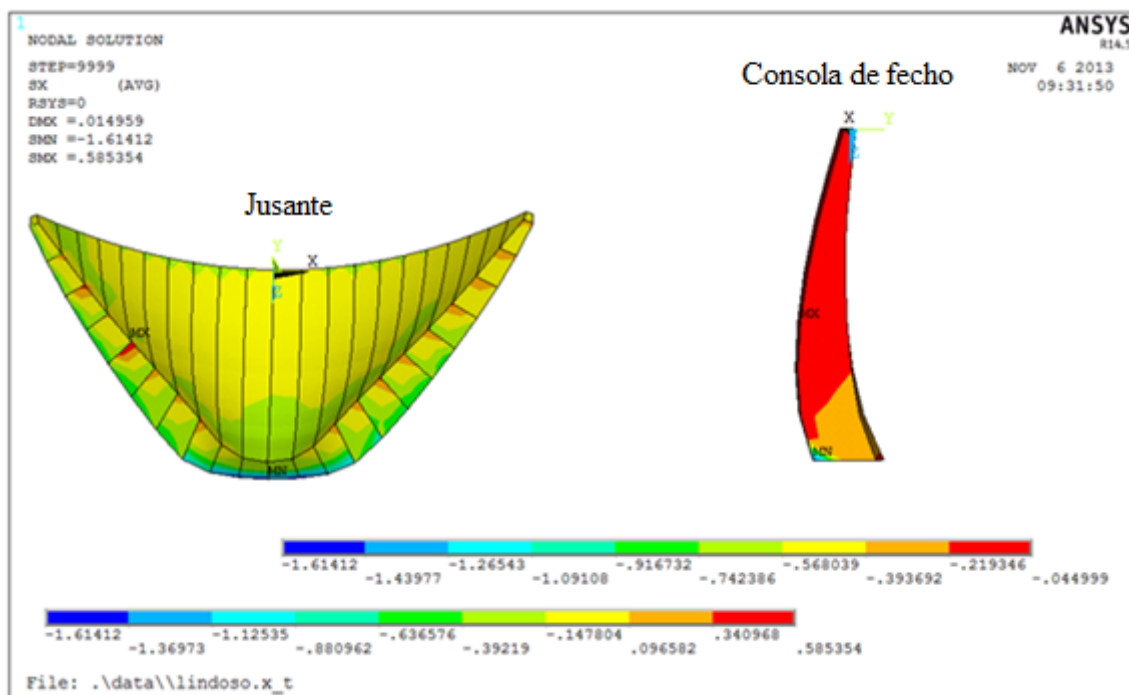


Fig. 115 – Tensões horizontais σ_x devido à combinação de ações PP+PI (MPa)

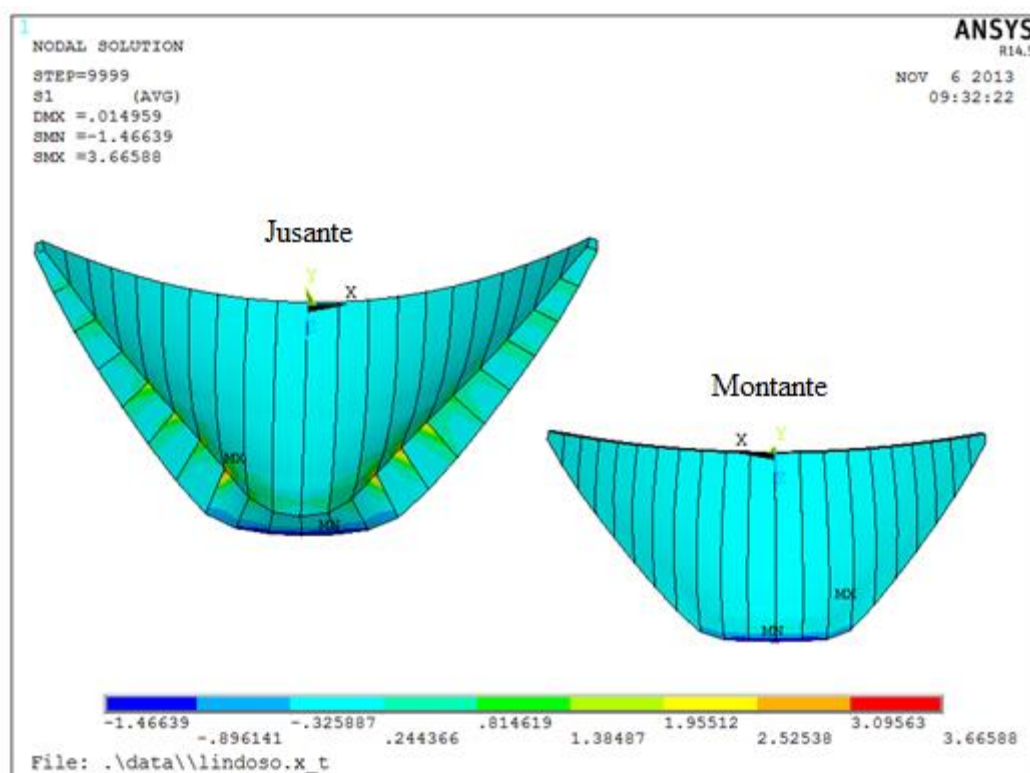


Fig. 116 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à combinação de ações PP+PI (MPa)

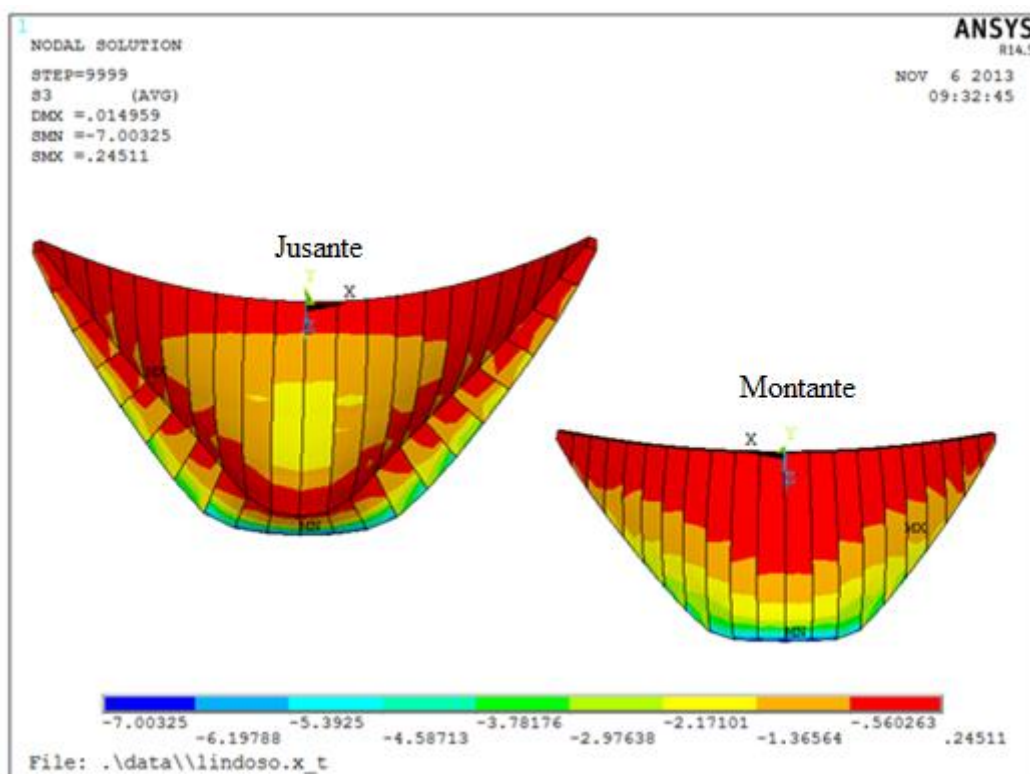


Fig. 117 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à combinação de ações PP+PI (MPa)

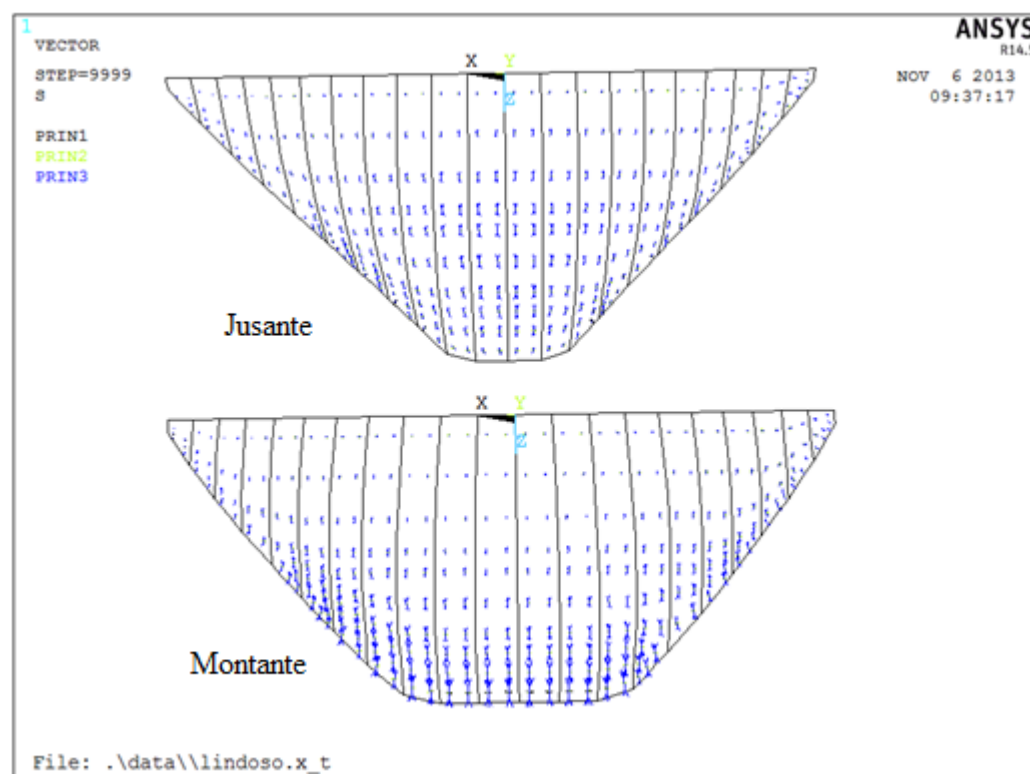


Fig. 118 – Direção das tensões principais devido à combinação de ações PP+PI

7.5.1.1. Deslocamentos radiais

De forma a verificar se a combinação de ações PP+PI foi realizada com sucesso, verifica-se o deslocamento radial, por exemplo, no ponto de coroamento do paramento de montante da barragem, que tem de ser igual à soma vectorial do deslocamento radial registado na ação isolada peso próprio com juntas abertas, na ação isolada da pressão de injeção. De facto, este valor, valida o processo de combinação 1, visto que, a soma das ações vetorialmente é $-0,009 - 6,987 = -6,996$ mm.

A imagem 113 reflecte a combinação da ação do peso próprio com o efeito da injeção das juntas de contração pela estratégia de injeção 3, notando-se uma simetria dos deslocamentos radiais em relação à junta central. Aliando esta imagem ao gráfico 12, é possível compreender a influência que cada ação tem nos resultados finais, para a junta em análise. Assim, o deslocamento radial, devido à ação do peso próprio é predominante até este atingir o seu valor máximo (cota 62m), e a partir daí, o seu deslocamento vai decrescente até se anular no coroamento da barragem. Todavia, o deslocamento radial provocado pelas injeções das juntas, aumenta de valor à medida que se vai injetando compartimentos localizados a cotas superiores, atingindo o seu máximo valor na zona de coroamento.

A combinação destas duas solicitações origina um deslocamento radial, representado pela curva a vermelho, atingindo o seu valor máximo à cota 79 m, e ao nível do coroamento apresenta um deslocamento radial de 7,00 mm para montante.

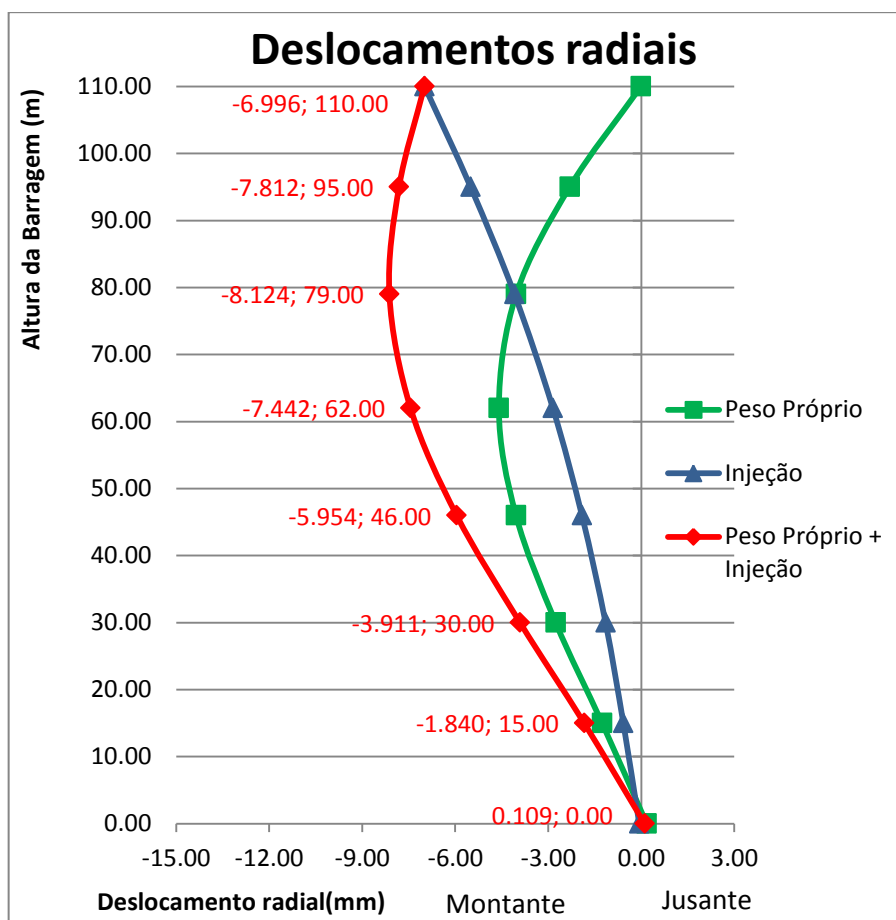


Gráfico 12 – Deslocamento radial da junta central no paramento de montante devido a PP, a PI e à combinação de PP+PI (mm).

Cotas dos patamares (m)		PP	PI	PP+PI
	110.00	-0.009	-6.987	-6.996
	95.00	-2.308	-5.504	-7.812
	79.00	-4.034	-4.090	-8.124
	62.00	-4.591	-2.851	-7.442
	46.00	-4.041	-1.914	-5.954
	30.00	-2.759	-1.151	-3.911
	15.00	-1.262	-0.579	-1.840
	0.00	0.175	-0.066	0.109

Tabela 20 – Deslocamento radial da junta central no paramento de montante devido a PP, a PI e à combinação de PP+PI (mm).

7.5.1.2. Abertura da junta central da barragem

Nos gráficos 13 e 14, são representados os movimentos horizontais das faces dos blocos 11 e 12 e os valores da abertura da junta, devido à ação isolada do peso próprio e da injeção das juntas, bem como da combinação de ambos. Assim, é possível avaliar mais uma vez, a influência de cada ação, na combinação.

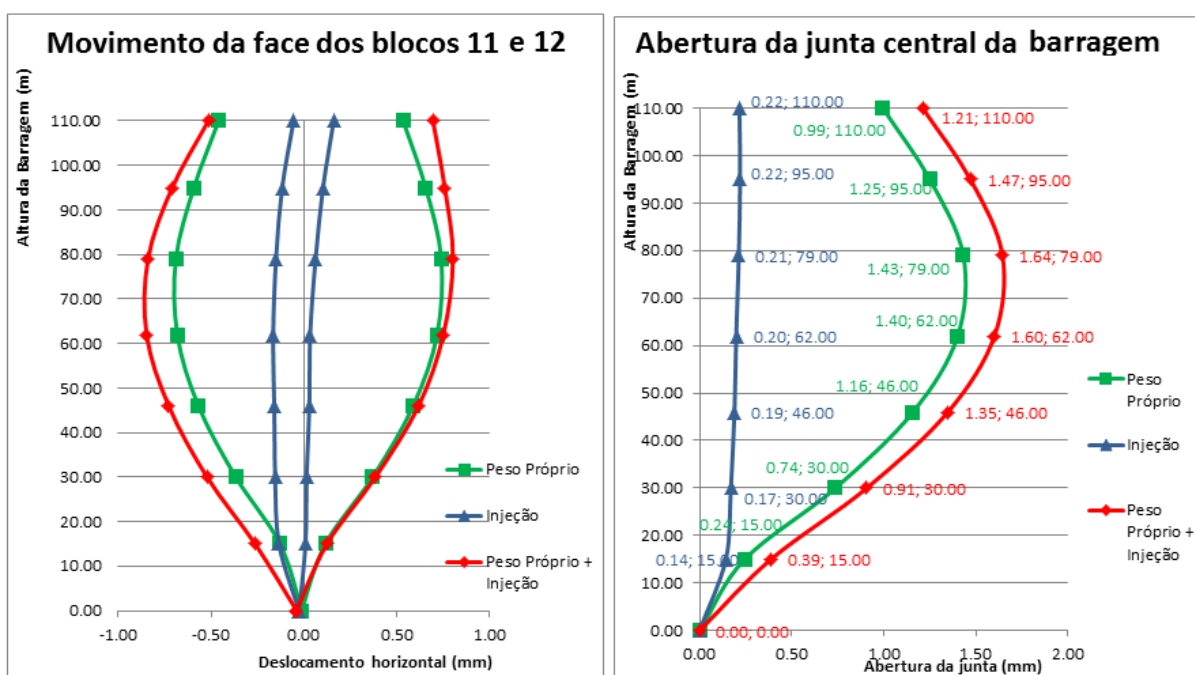


Gráfico 13 - Movimento das faces dos blocos 11 e 12 e Abertura da junta central no paramento de montante devido a PP, a PI e à combinação de PP+PI (mm).

		PP		PI		PP+PI	
		B11	B12	B11	B12	B11	B12
Cotas dos patamares (m)	110.00	0.53	-0.46	0.16	-0.06	0.70	-0.52
	95.00	0.66	-0.59	0.10	-0.12	0.76	-0.71
	79.00	0.74	-0.69	0.06	-0.15	0.80	-0.84
	62.00	0.72	-0.68	0.03	-0.17	0.75	-0.85
	46.00	0.59	-0.57	0.03	-0.16	0.62	-0.73
	30.00	0.37	-0.37	0.01	-0.15	0.39	-0.52
	15.00	0.12	-0.13	0.01	-0.13	0.12	-0.26
	0.00	-0.01	-0.01	-0.03	-0.03	-0.04	-0.04

Tabela 21 – Movimento das faces dos blocos 11 e 12 devido a PP, a PI e à combinação de PP+PI (mm).

7.5.1.3. Tensões principais

Na combinação da ação do peso próprio com a injeção de juntas, é de salientar, a existência, em praticamente todo o paramento de jusante, de tensões de tração. Pela figura 116 e pelo gráfico 15, para o paramento de montante, verifica-se que as tensões de compressão aumentam à medida que se vai aproximando do pé da barragem, atingindo o máximo valor nesta zona, sendo a junta central um “espelho” desta constatação. Este aumento de tensão na base de montante da barragem é natural, devido à inclinação dos blocos da barragem.

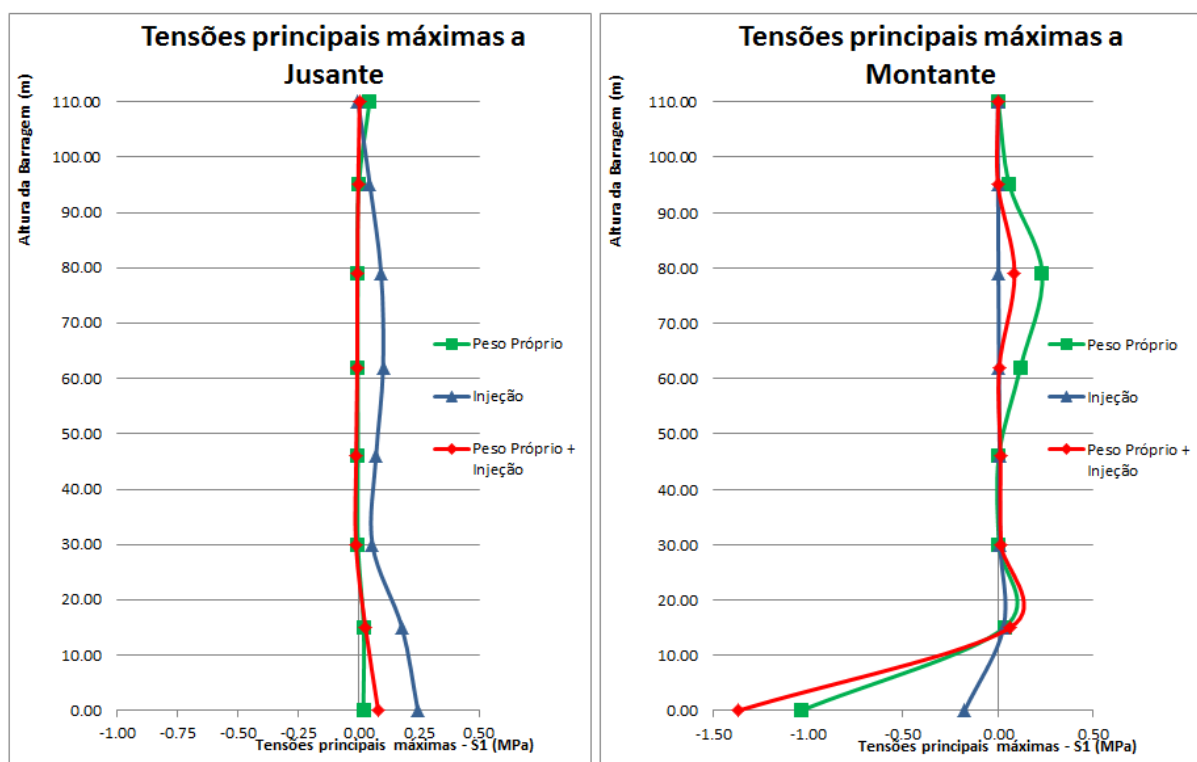


Gráfico 14 - Tensões principais máximas (σ_1) ao longo da junta central devido à combinação das ações PP+PI (MPa)

		Jusante (MPa)			Montante (MPa)		
		PP	PI	PP+PI	PP	PI	PP+PI
Cotas dos patamares (m)	110.00	0.046	-0.002	0.005	0.003	0.001	0.003
	95.00	0.002	0.048	-0.001	0.061	0.002	0.002
	79.00	-0.003	0.094	-0.004	0.235	0.004	0.089
	62.00	-0.003	0.103	-0.005	0.120	0.007	0.008
	46.00	-0.002	0.073	-0.009	0.006	0.010	0.015
	30.00	-0.002	0.058	-0.010	0.006	0.013	0.018
	15.00	0.022	0.181	0.029	0.035	0.030	0.066
	0.00	0.021	0.247	0.082	-1.038	-0.175	-1.368

Tabela 22 – Tensões principais máximas ao longo da junta central devido à combinação das ações PP+PI (MPa)

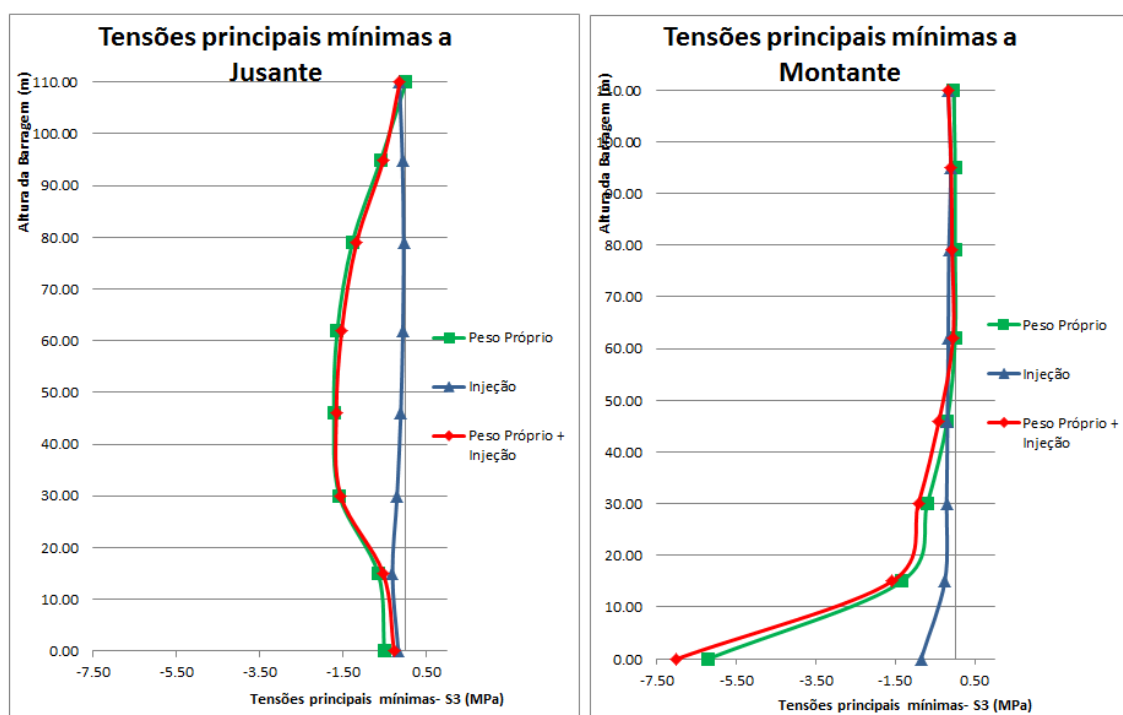


Gráfico 15 - Tensões principais mínimas ao longo da junta central devido à combinação das ações PP+PI (MPa)

		Jusante (MPa)			Montante (MPa)		
		PP	PI	PP+PI	PP	PI	PP+PI
Cotas dos patamares (m)	110.00	0.002	-0.156	-0.149	-0.038	-0.179	-0.176
	95.00	-0.602	-0.084	-0.542	-0.003	-0.112	-0.101
	79.00	-1.284	-0.055	-1.183	-0.003	-0.157	-0.079
	62.00	-1.646	-0.074	-1.539	-0.002	-0.174	-0.055
	46.00	-1.726	-0.121	-1.670	-0.201	-0.193	-0.408
	30.00	-1.597	-0.212	-1.563	-0.702	-0.216	-0.928
	15.00	-0.665	-0.324	-0.543	-1.338	-0.261	-1.587
	0.00	-0.515	-0.183	-0.285	-6.216	-0.859	-7.003

Tabela 23 – Tensões principais mínimas ao longo da junta central devido à combinação das ações PP+PI (MPa)

7.5.1.4. Tensões horizontais

As tensões horizontais atuantes na barragem, são analisadas com base na figura 115, onde se verifica uma certa simetria em relação ao eixo da barragem.

No gráfico 16 são representadas as distribuições de tensões na direção dos arcos, ao longo da junta central, no paramento de jusante e montante da barragem. Toda a espessura da barragem está sujeita a tensões de compressão na direção dos arcos, atingindo o seu valor máximo, na zona de fecho, a jusante aproximadamente à cota 30 m e a montante junto ao pé da barragem.

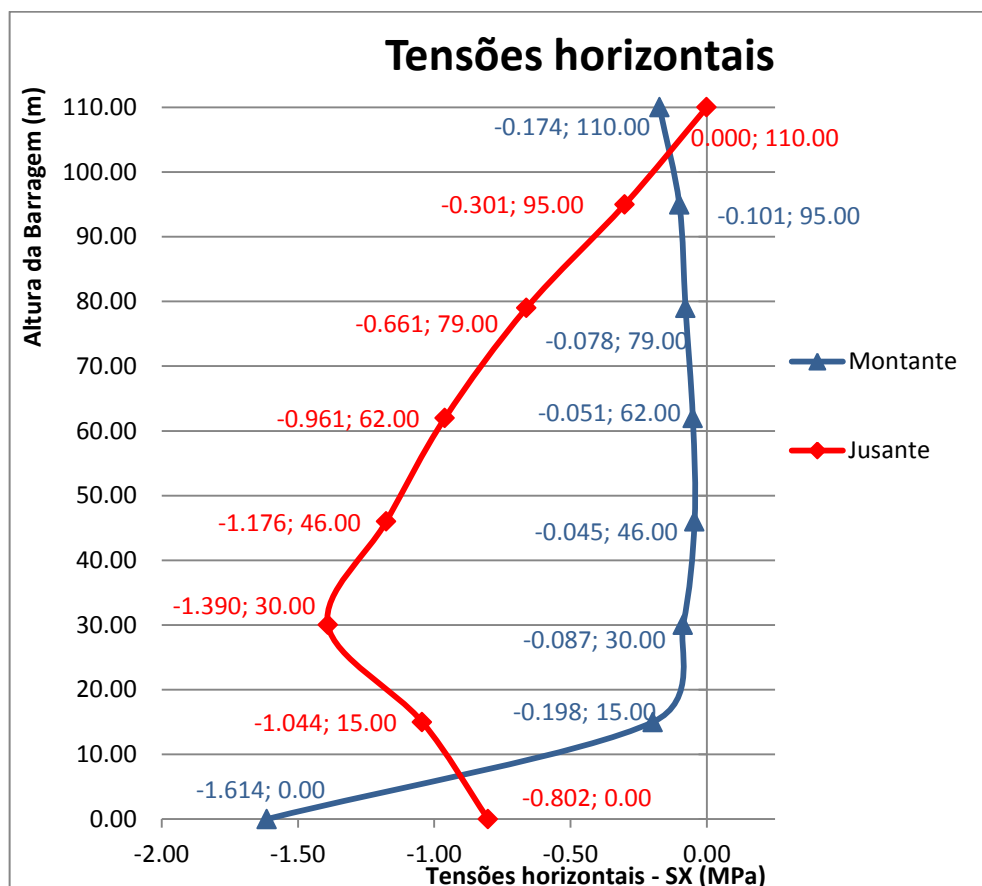


Gráfico 16 - Tensões horizontais (σ_x) ao longo da junta central devido à combinação das ações PP+PI (MPa)

7.5.2. COMBINAÇÃO AÇÕES PP+PI+PH DURANTE A FASE DO ENCHIMENTO DA ALBUFEIRA (COMBINAÇÃO 2)

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados da combinação 2.

7.5.2.1. Deslocamentos radiais

7.5.2.1.1 Albufera vazia (0 m)

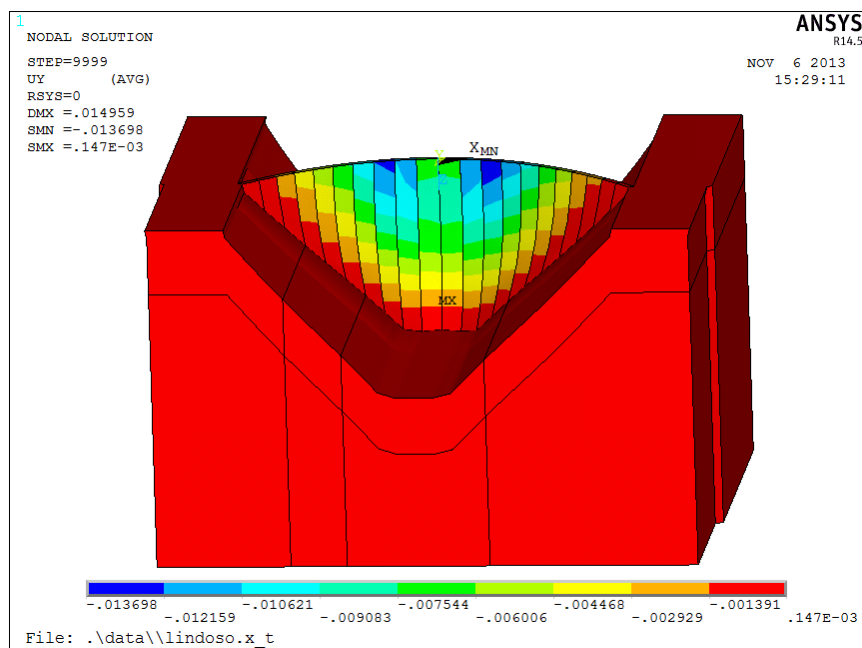


Fig. 119 – Deslocamento radial devido à combinação das ações PP+PI+PH – albufera vazia (m)

7.5.2.1.2. Albufera em NmE (51 m)

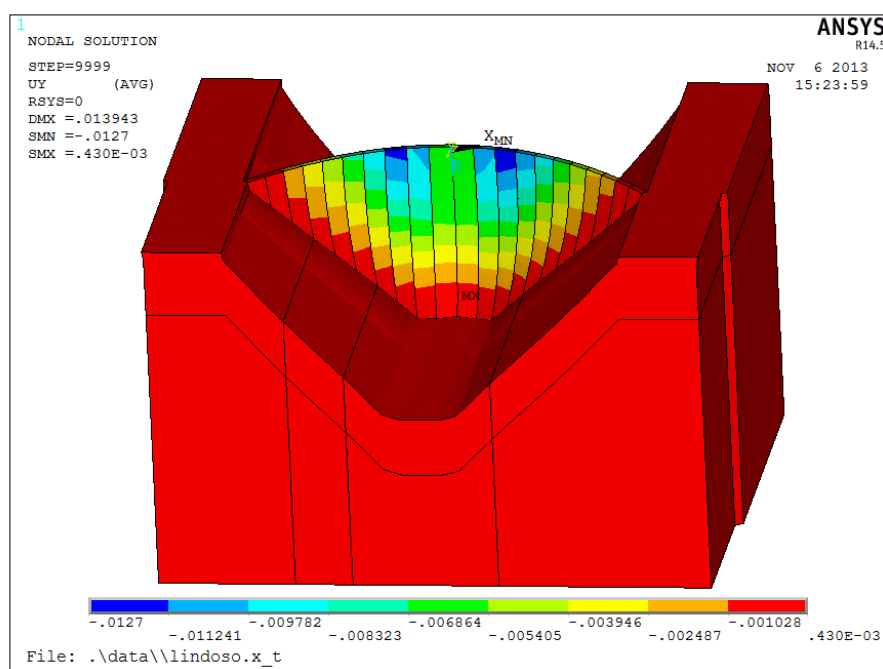


Fig. 120 – Deslocamento radial devido à combinação das ações PP+PI+PH – albufera em NmE (m)

7.5.2.1.3. Albufera ao nível 83 m

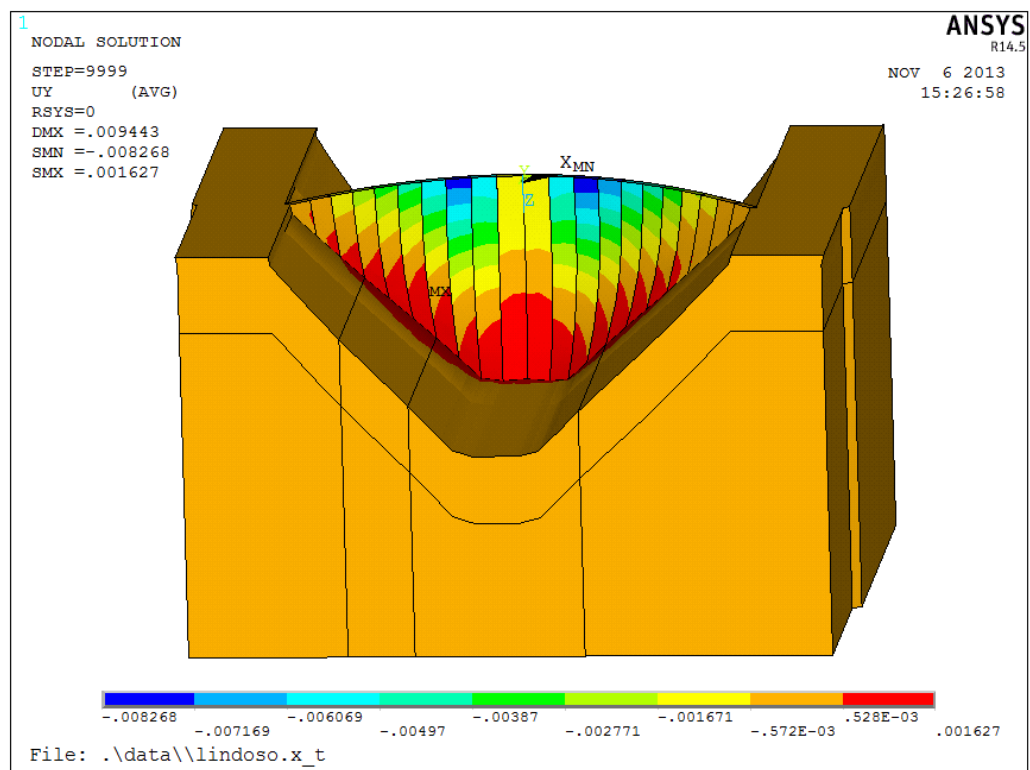


Fig. 121 – Deslocamento radial devido à combinação das ações PP+PI+PH – albufera ao nível 83m (m)

7.5.2.1.4. Albufera em NPA (109 m)

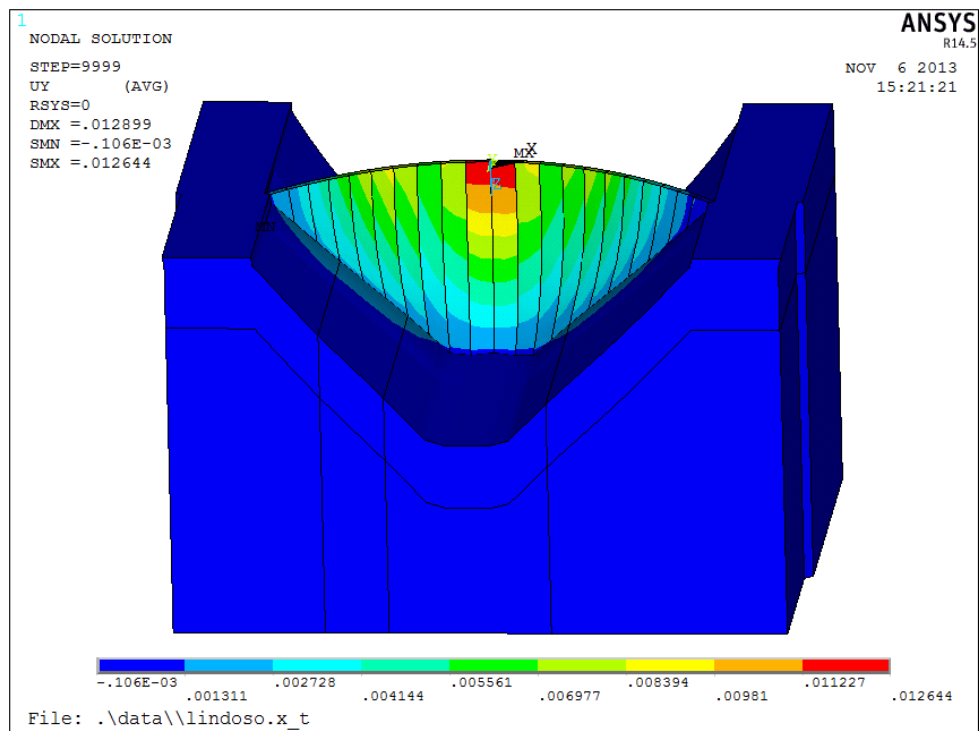


Fig. 122 – Deslocamento radial devido à combinação das ações PP+PI+PH - albufera em NPA (m)

7.5.2.1.5. Albufera em NMC (110 m)

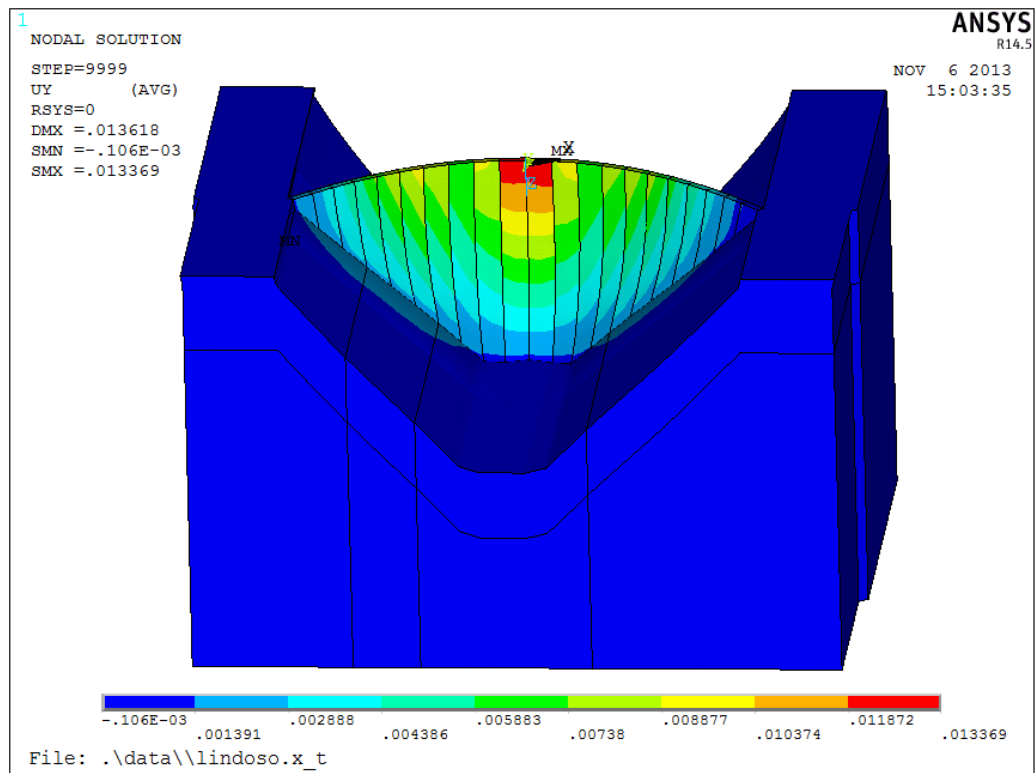


Fig. 123 – Deslocamento radial devido à combinação das ações PP+PI+PH - albufera em NMC (m)

De forma a verificar se a combinação de ações PP+PI+PH, foi realizada com sucesso, verifica-se o deslocamento radial, por exemplo, no ponto de coroamento do paramento de montante da barragem, que tem de ser igual à soma vectorial do deslocamento radial registado na ação isolada peso próprio com juntas abertas, na ação isolada da pressão de injeção e na ação isolada pressão hidrostática em NMC. De facto, este valor, valida o processo de combinação 2, visto que, a soma das ações vectorialmente é $-0,01 - 6,99 + 19,74 = 12,74$ mm.

Analisando o estado de deformação da barragem, evidencia-se, que a ação da pressão hidrostática influencia consideravelmente os deslocamentos radiais da estrutura. De acordo com os quatro níveis de enchimento da albufera, verifica-se que, quando a albufera está vazia ou se encontra em Nível mínimo de Exploração, a barragem possui um deslocamento radial para montante, ao invés, caso a albufera se encontre cheia, a barragem tende a deslocar-se para jusante. Foi realizada ainda a análise para o nível de água da albufera à cota 83m, e neste caso, verificou-se que ocorria a inversão do sentido dos deslocamentos dos blocos (figura 121).

Assim, para níveis elevados de enchimento da albufera, evidencia-se a tendência da barragem se deslocar em direção a jusante.

O gráfico 17, pretende clarificar esta análise, sendo representados os deslocamento radiais da junta central no paramento de montante, devido às ações isoladas PP e PI e às combinações de ações 1 e 2, referidas no início do capítulo.

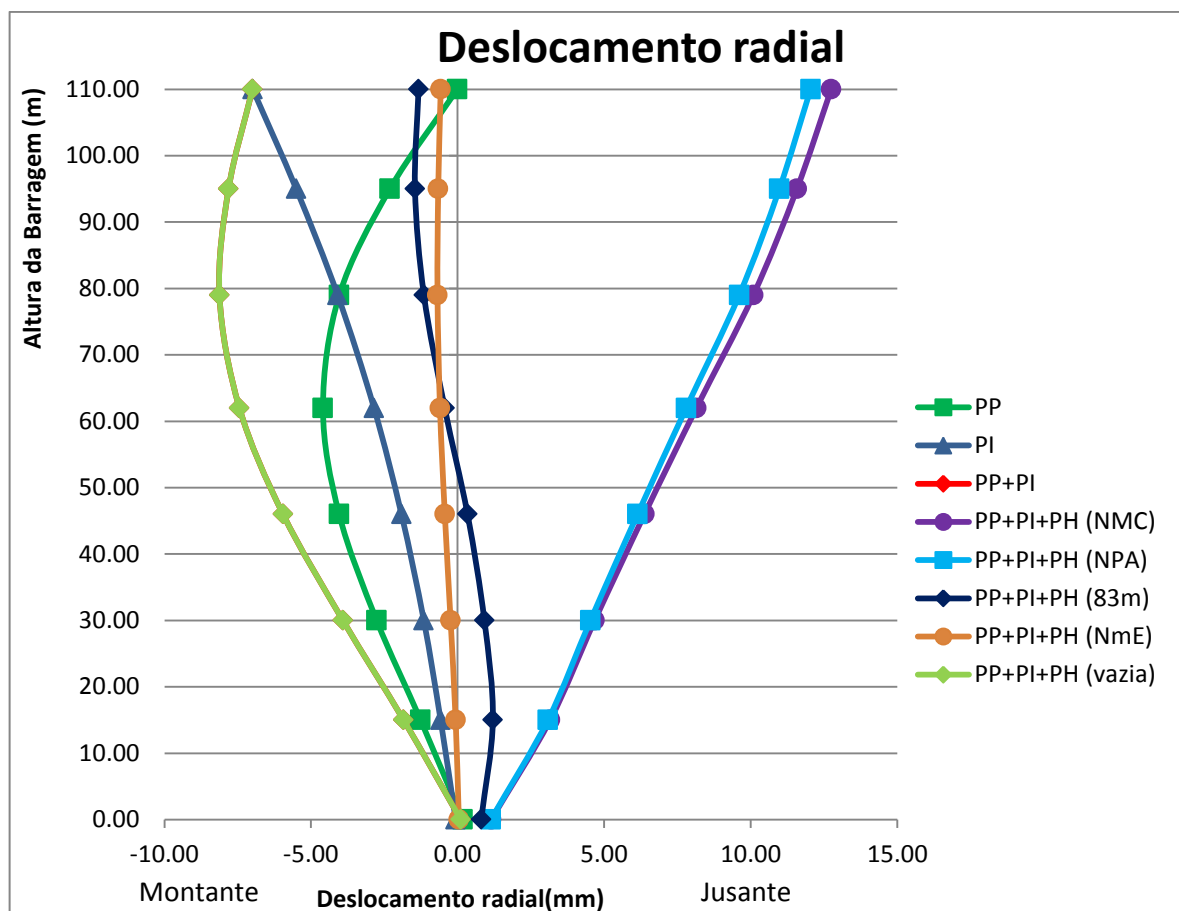


Gráfico 17 – Deslocamento radial da junta central no paramento de montante devido às ações isoladas PP e PI, e às combinações de ações 1 e 2.

		PP	PI	PP+PI	PH					PP+PI+PH				
					NMC	NPA	83m	NmE	Vazia	NMC	NPA	83m	NmE	Vazia
Cotas dos patamares (m)	110.00	-0.009	-6.987	-6.996	19.74	19.04	5.67	1.25	0.00	12.75	12.04	-1.33	-0.57	-7.00
	95.00	-2.308	-5.504	-7.812	19.39	18.79	6.36	1.21	0.00	11.58	10.98	-1.45	-0.66	-7.81
	79.00	-4.034	-4.090	-8.124	18.21	17.73	6.98	1.28	0.00	10.09	9.61	-1.15	-0.68	-8.12
	62.00	-4.591	-2.851	-7.442	15.59	15.24	7.00	1.45	0.00	8.15	7.80	-0.44	-0.60	-7.44
	46.00	-4.041	-1.914	-5.954	12.33	12.09	6.29	1.60	0.00	6.38	6.14	0.34	-0.44	-5.95
	30.00	-2.759	-1.151	-3.911	8.59	8.44	4.83	1.53	0.00	4.68	4.53	0.92	-0.24	-3.91
	15.00	-1.262	-0.579	-1.840	5.00	4.92	3.04	1.18	0.00	3.16	3.08	1.20	-0.07	-1.84
	0.00	0.175	-0.066	0.109	1.04	1.03	0.70	0.32	0.00	1.15	1.13	0.81	0.04	0.11

Tabela 24 - Deslocamento radial da junta central no paramento de montante devido às ações isoladas PP e PI, e às combinações de ações 1 e 2.

7.5.2.2. Tensões principais

Considerando a albufera no Nível Máximo de Cheia, ou seja, à cota 110 m, verifica-se que, pela figura 124 e 125, ocorrem tensões de compressão em todo o paramento de jusante, aumentando em

direção ao coroamento e ao pé de jusante da barragem. Relativamente ao paramento de montante é de salientar o aparecimento de trações na zona junto ao maciço de fundação e de compressões no restante paramento, atingindo na zona central da barragem, os valores mais elevados.

Pelo gráfico 18, respeitante à junta central da barragem, é mais evidente esta análise efetuada, salientando-se o facto de, no pé de montante da barragem, surgem tensões de tração, e nas restantes zonas da barragem, tensões de compressão.

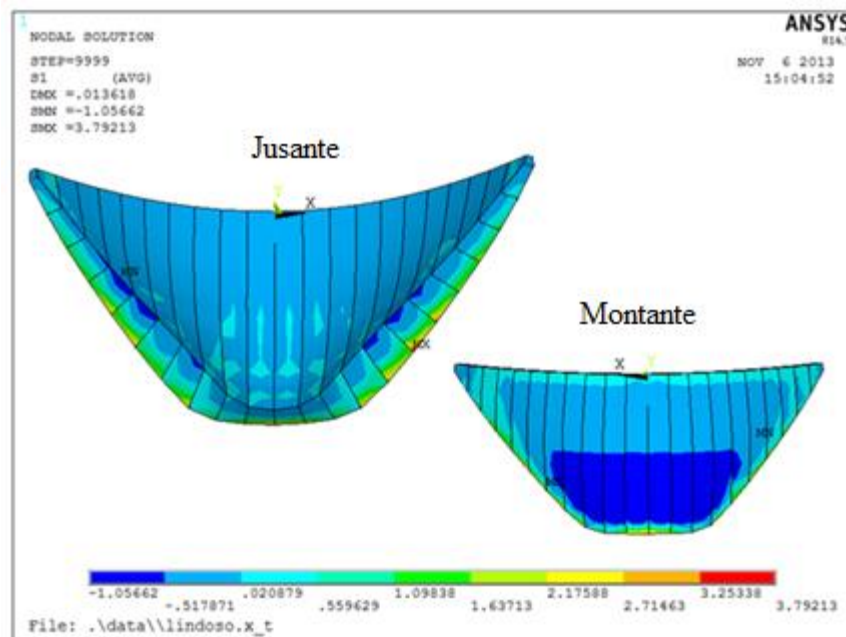


Fig. 124 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à combinação das ações PP+PI+PH (MPa)

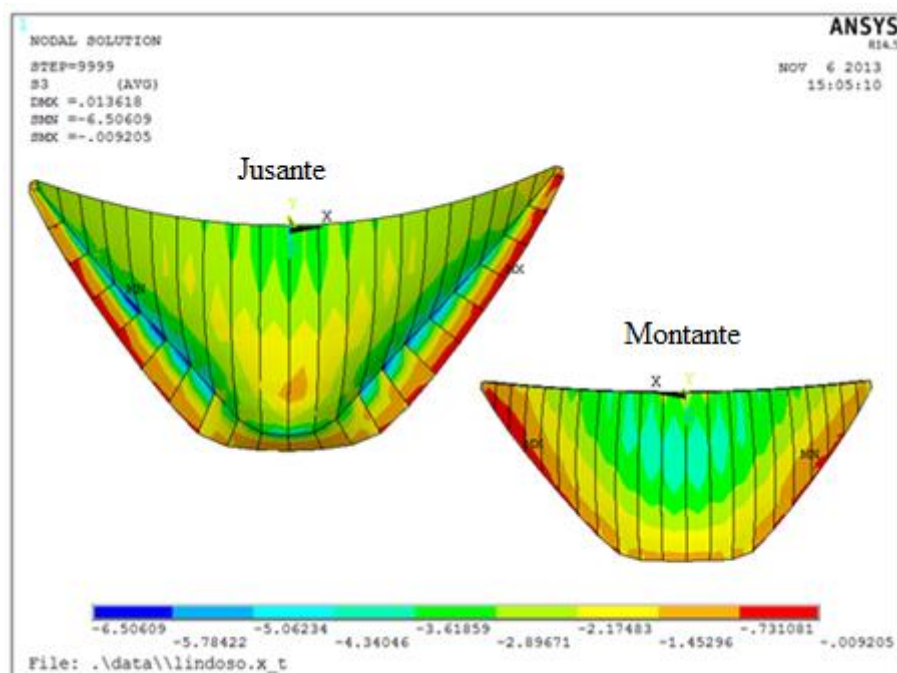


Fig. 125 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à combinação das ações PP+PI+PH (MPa)

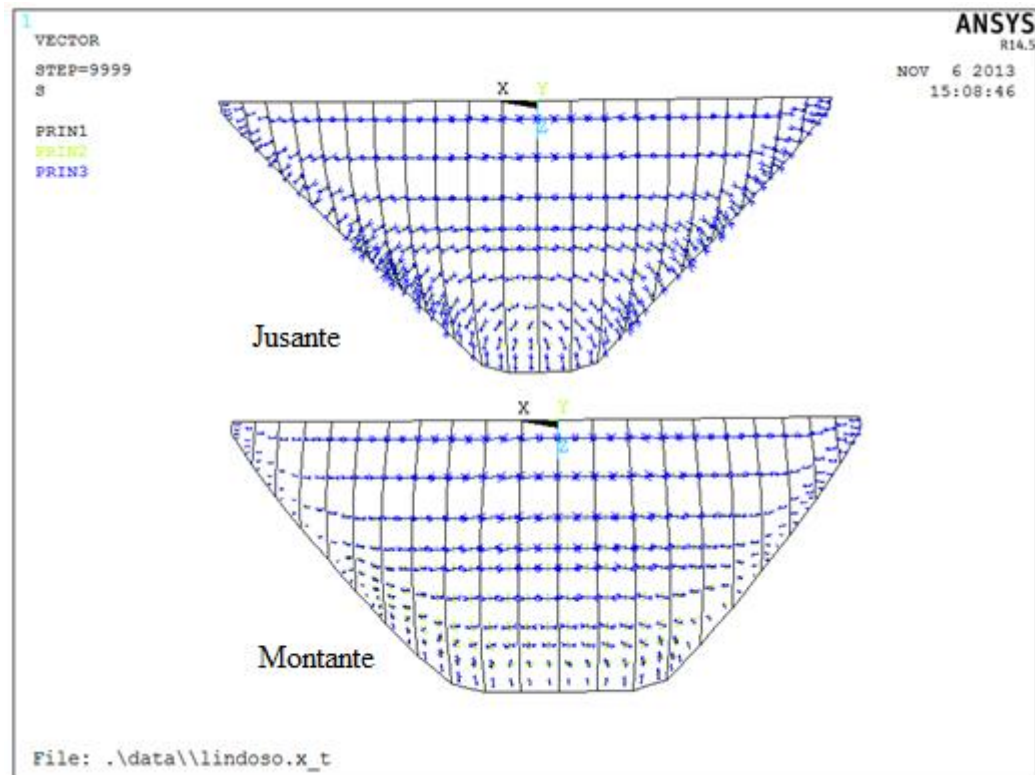


Fig. 126 – Direção das tensões principais devido à combinação das ações PP+PI+PH

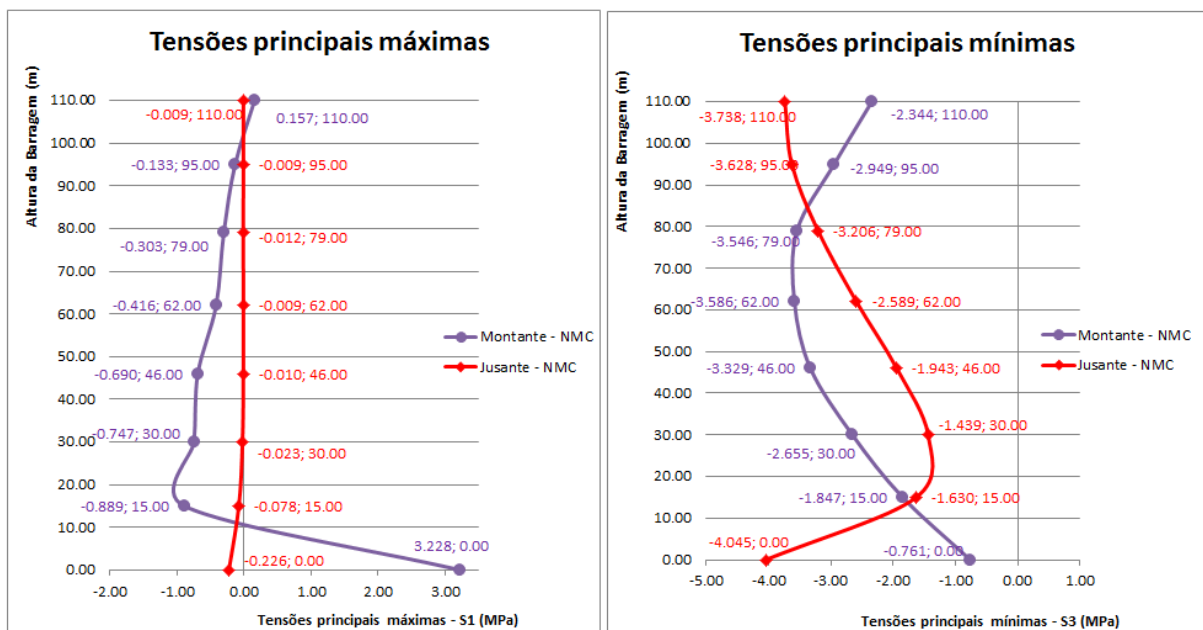


Gráfico 18 – Tensões principais máximas e mínimas, respetivamente, na junta central, devido à combinação das ações PP+PI+PH

7.5.2.3. Tensões horizontais

As tensões horizontais nas direções dos arcos, correspondem a tensões de compressão em ambos os paramentos, como se verifica na figura 127 e no gráfico 19. No entanto há que ressaltar o aparecimento de pequenas trações no pé de montante da barragem (efeito da fundação).

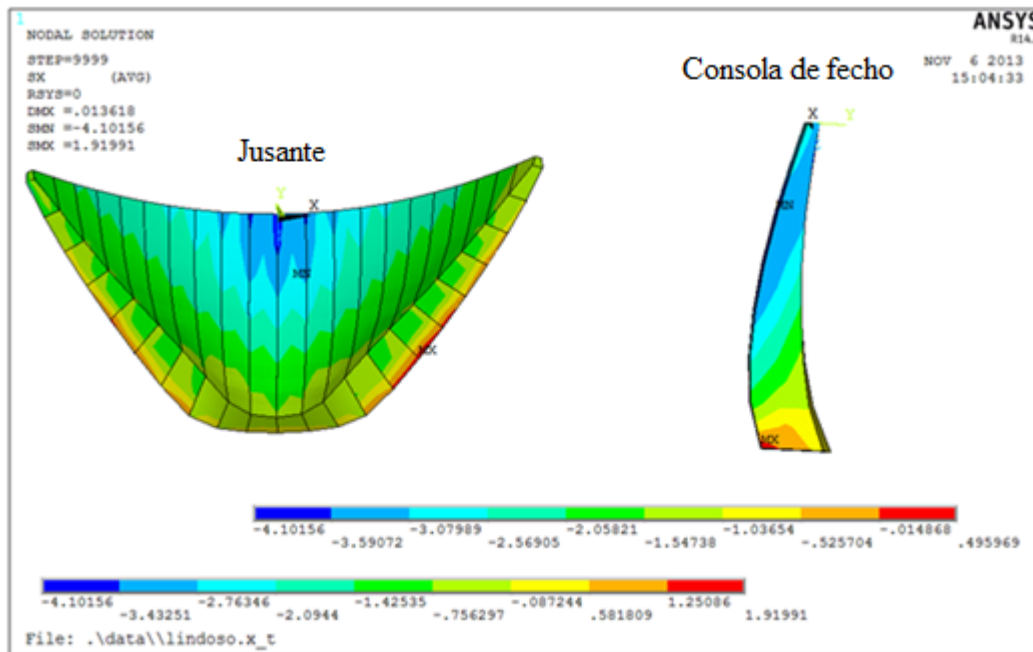


Fig. 127 – Tensões horizontais σ_x , devido à combinação das ações PP+PI+PH (MPa)

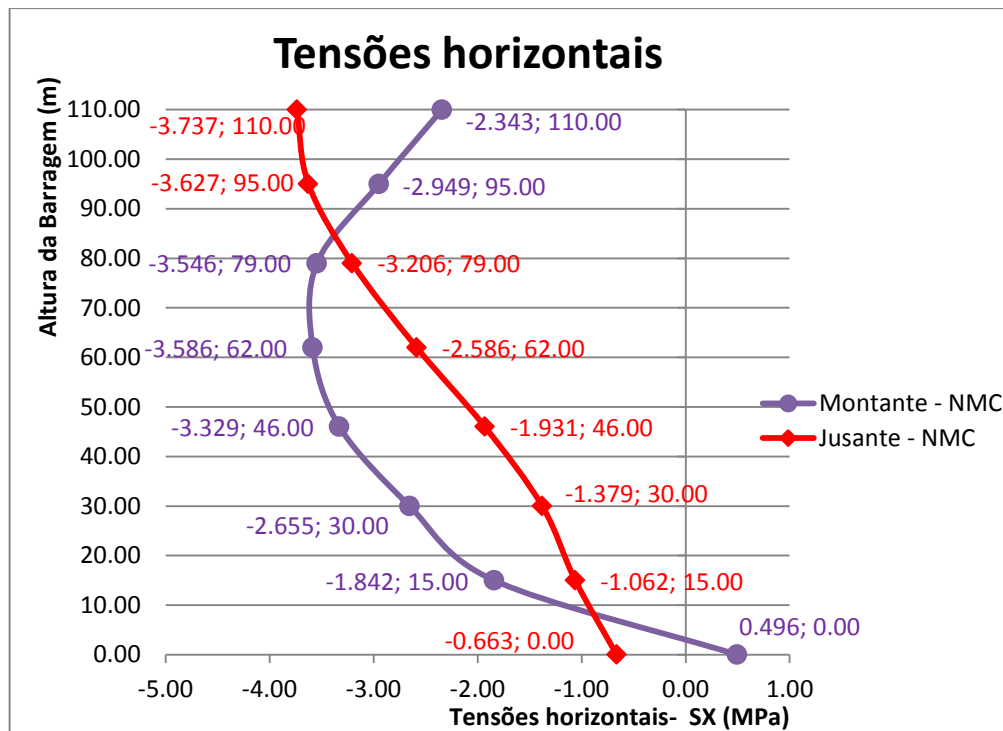


Gráfico 19 – Tensões horizontais na junta central devido à combinação das ações PP+PI+PH

7.5.3. COMBINAÇÃO DAS AÇÕES PP+PH DURANTE A FASE DO ENCHIMENTO DA ALBUFEIRA (COMBINAÇÃO 3)

A combinação 3 engloba a ação do peso próprio, considerando as juntas da barragem fechadas, e a ação da pressão hidrostática, considerando a albufeira em Nível Máximo de Cheia (cota de coroamento). Esta combinação foi efetuada, com vista a comparar os resultados obtidos, com os resultados da combinação 2, permitindo analisar assim, a influência das pressões de injeção relativamente aos estados de deformação e tensão presentes na estrutura.

7.5.3.1. Deslocamentos radiais

De forma a verificar se a combinação de ações PP+PH, foi realizada com sucesso, verifica-se o deslocamento radial, por exemplo, no ponto de coroamento do paramento de montante da barragem, que tem de ser igual à soma vectorial do deslocamento radial registado na ação isolada peso próprio com juntas fechadas e na ação isolada pressão hidrostática em NMC. De facto, este valor, valida o processo de combinação 3, visto que, a soma das ações vectorialmente é $-2,19+19,74=17,55$ mm.

Pela figura 128, verifica-se uma simetria dos deslocamentos radiais em relação à junta central, apresentando o seu máximo valor, na zona central da barragem perto da cota de coroamento. Esta combinação, ao não ser afetada pelo efeito da pressão de injeção, proporciona genericamente, deslocamentos superiores para jusante.

Comparativamente com a combinação 2, esta combinação, apresenta um padrão de deslocamentos mais uniforme.

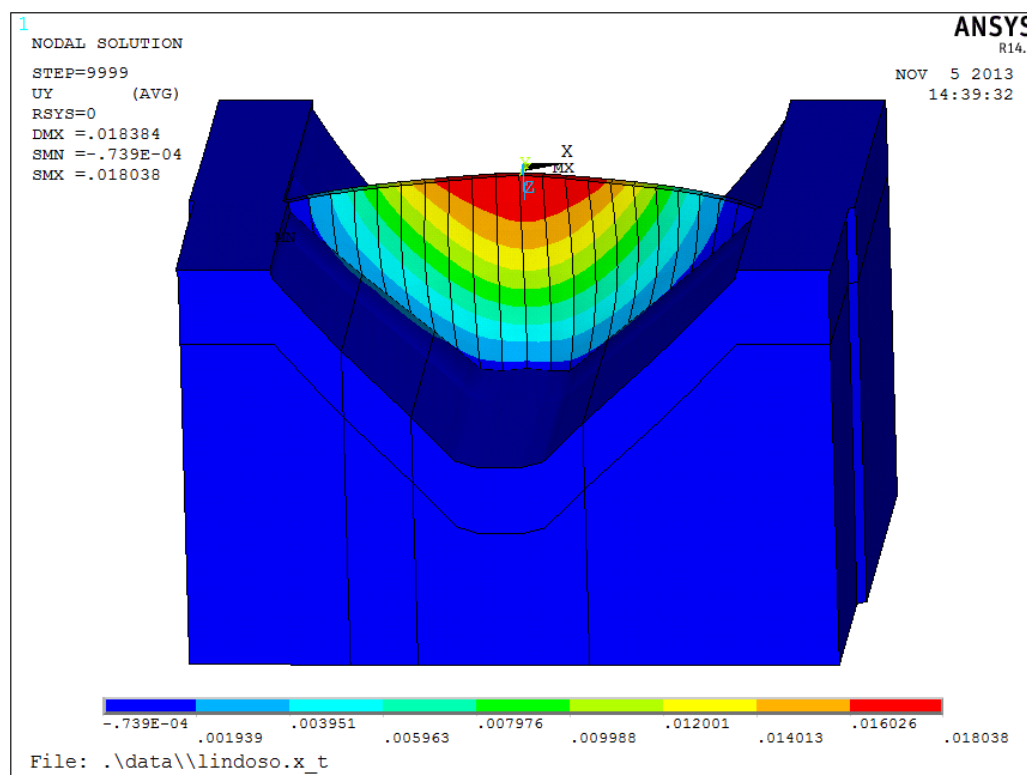


Fig. 128 – Deslocamento radial devido à combinação das ações PP+PH - albufeira em NMC (m)

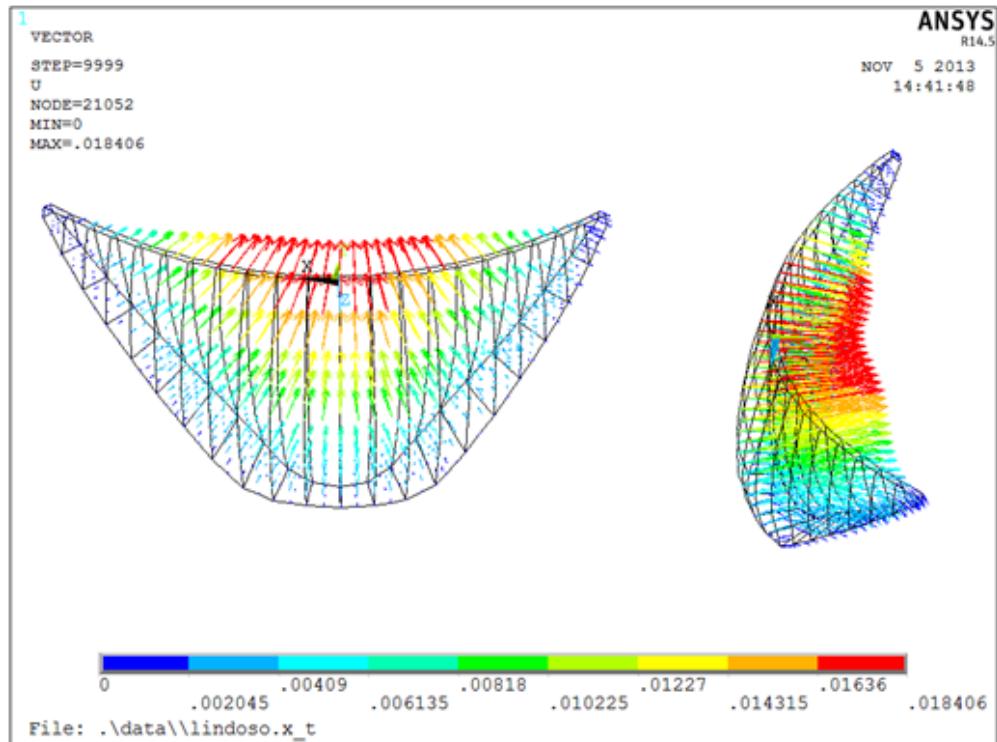


Fig. 129 – Vetores de deslocamentos devido à combinação das ações PP+PH - albufera em NMC (m)

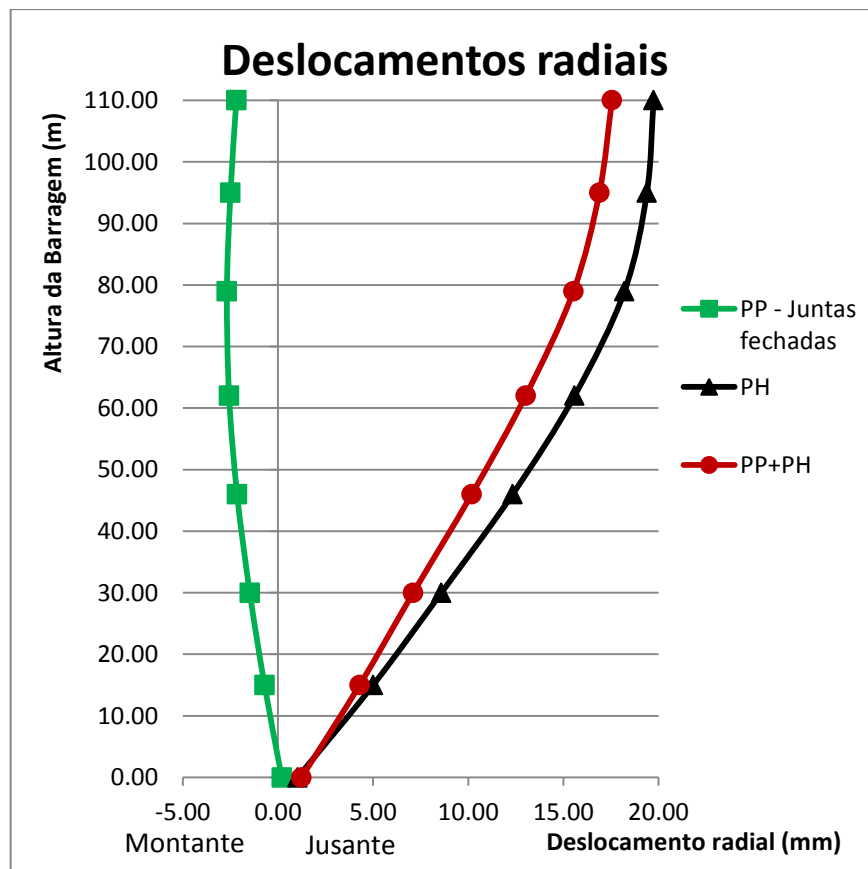


Gráfico 20 – Deslocamento radial da junta central no paramento de montante devido às ações isoladas PP (com juntas fechadas) e PH, e à combinação 3

		PP	PH	PP+PH
Cotas dos patamares (m)	110.00	-2.19	19.74	17.56
	95.00	-2.49	19.39	16.90
	79.00	-2.68	18.21	15.53
	62.00	-2.57	15.59	13.02
	46.00	-2.15	12.33	10.18
	30.00	-1.48	8.59	7.11
	15.00	-0.71	5.00	4.29
	0.00	0.20	1.04	1.24

Tabela 25 - Deslocamento radial da junta central no paramento de montante devido às ações isoladas PP (com juntas fechadas) e PH, e à combinação 3

7.5.3.2. Tensões principais

São representadas no gráfico 21, as tensões principais máximas e mínimas, respetivamente, ao longo da junta central no paramento de montante e jusante da barragem.

Através destes gráficos, e pelas imagens relativas às tensões principais máximas, evidencia-se a existência de tensões de tração de valor próximo dos 1,5MPa junto ao pé da barragem, no paramento de montante, aquando da albufeira em Nível Máximo de Cheia, e tensões de compressão no restante paramento da barragem, bem como no pé da barragem a jusante. De salientar, a existência de um pico de tensão de tração num nó junto ao pé de montante da barragem, de valor 2,7MPa, que não é representativo visto ser muito localizado.

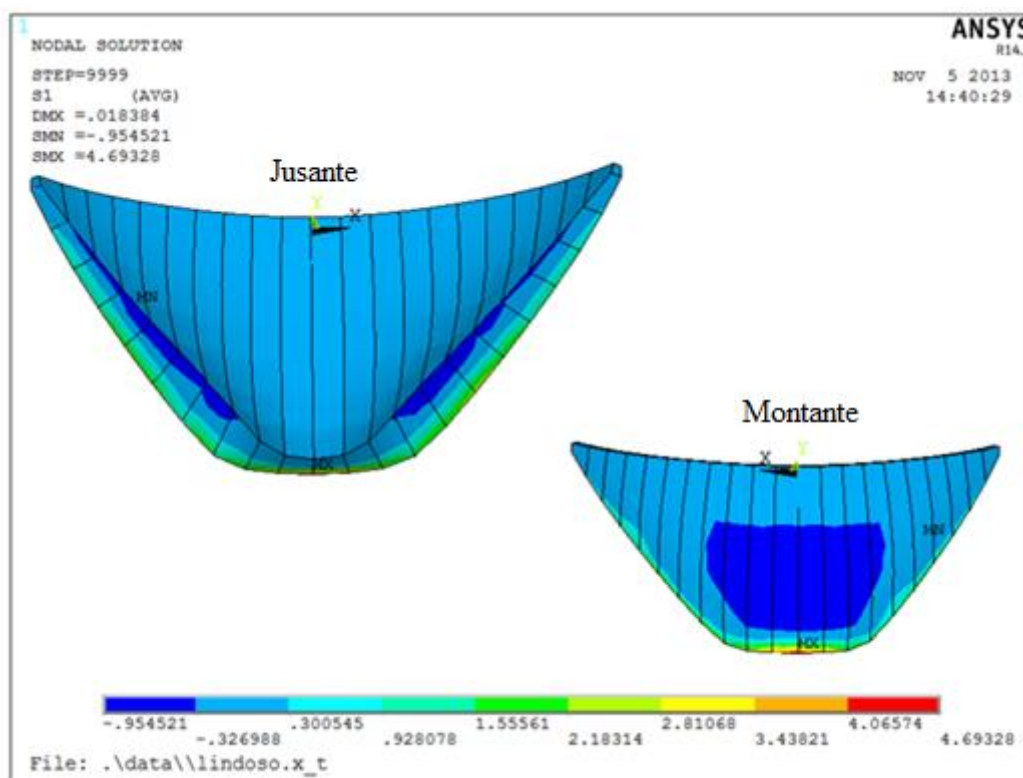


Fig. 130 – Tensões principais máximas (σ_1) devido à combinação das ações PP+PH (MPa)

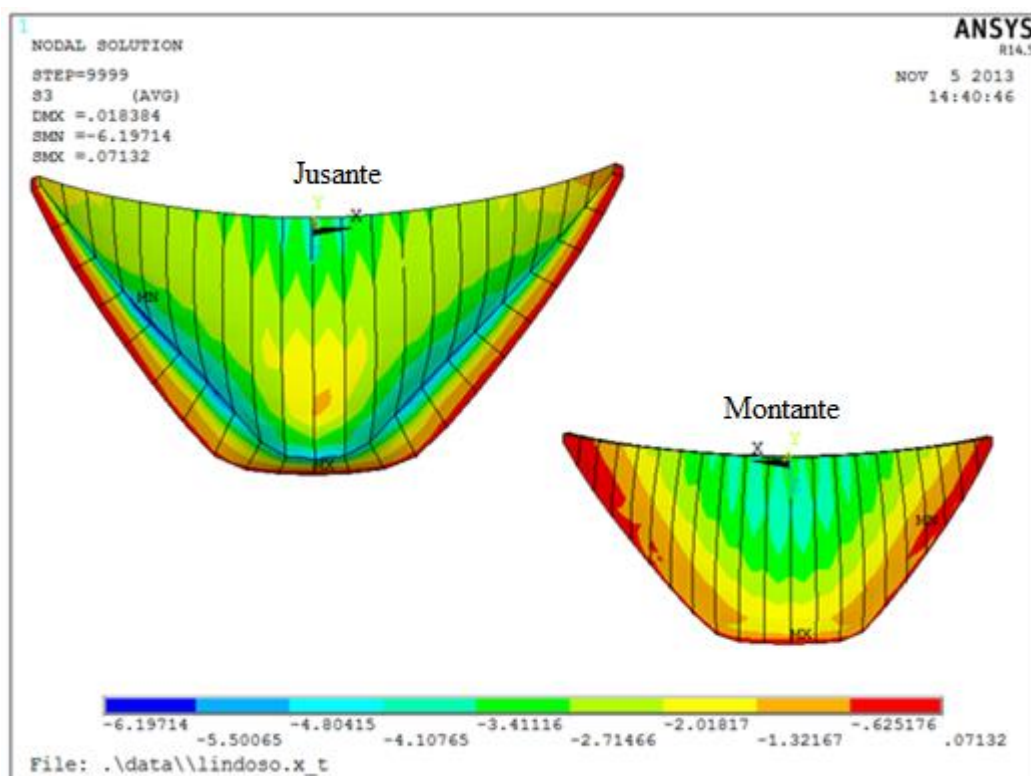


Fig. 131 – Tensões principais mínimas (σ_3) devido à combinação das ações PP+PH (MPa)

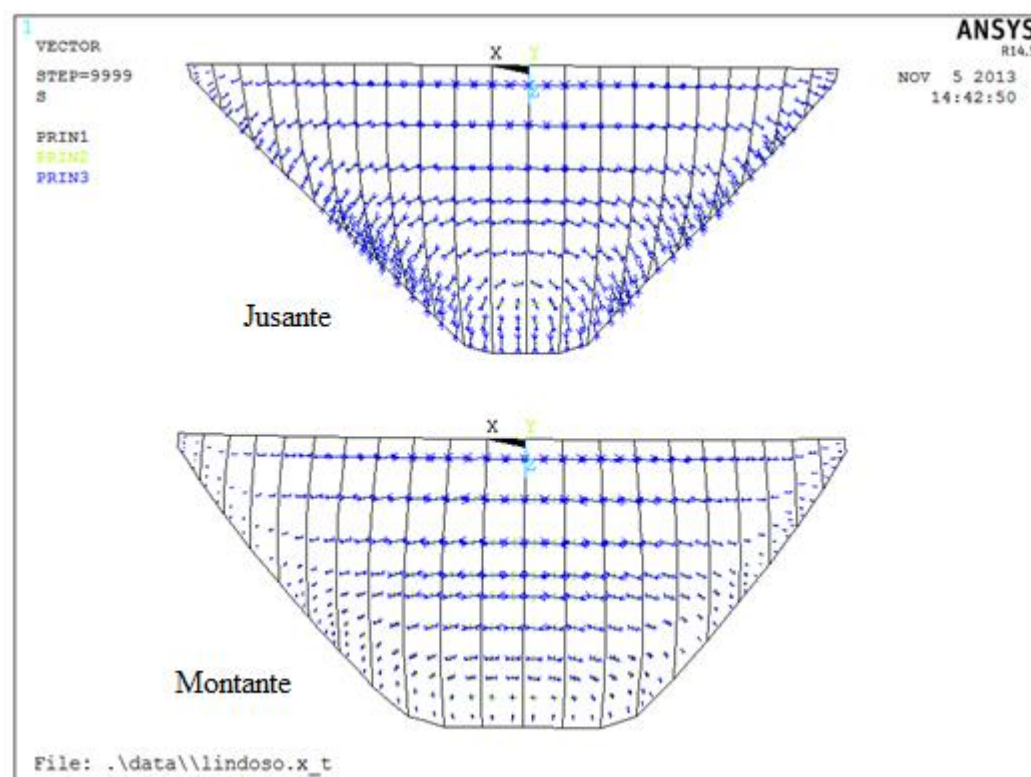


Fig. 132 – Direção das tensões principais devido à combinação das ações PP+PH

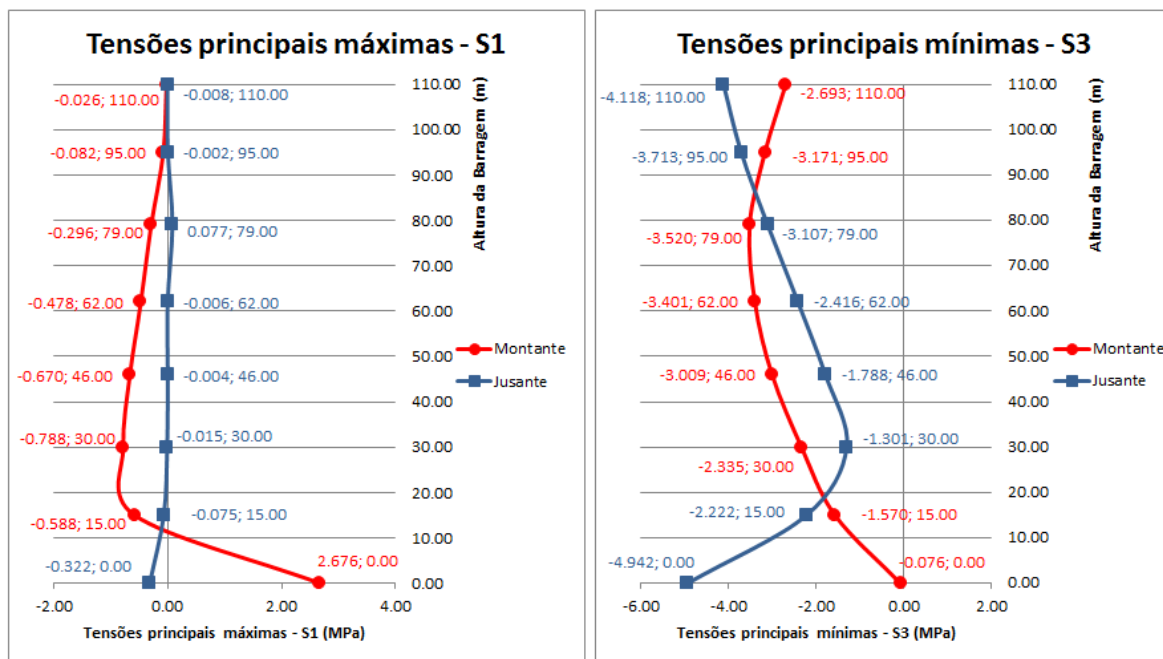


Gráfico 21 – Tensões principais máximas e mínimas, na junta central, devido à combinação das ações PP+PH

7.5.3.3. Tensões horizontais

Em ambos os paramentos as tensões horizontais são de compressão, com a exceção da zona de inserção da barragem no maciço de fundação, a montante, que se verifica o aparecimento de pequenas trações. Pela figura 133, constata-se que as maiores tensões de compressão na direção dos arcos, ocorrem na zona do coroamento central da barragem e tendem a diminuir em direção ao maciço de fundação adjacente e lateral.

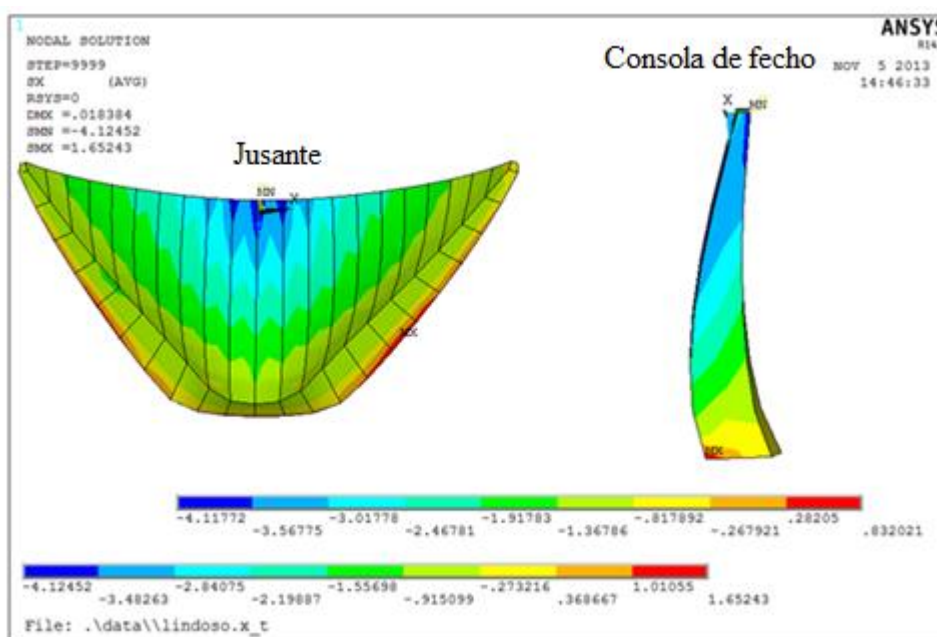


Fig. 133 – Tensões horizontais devido à combinação das ações PP+PH

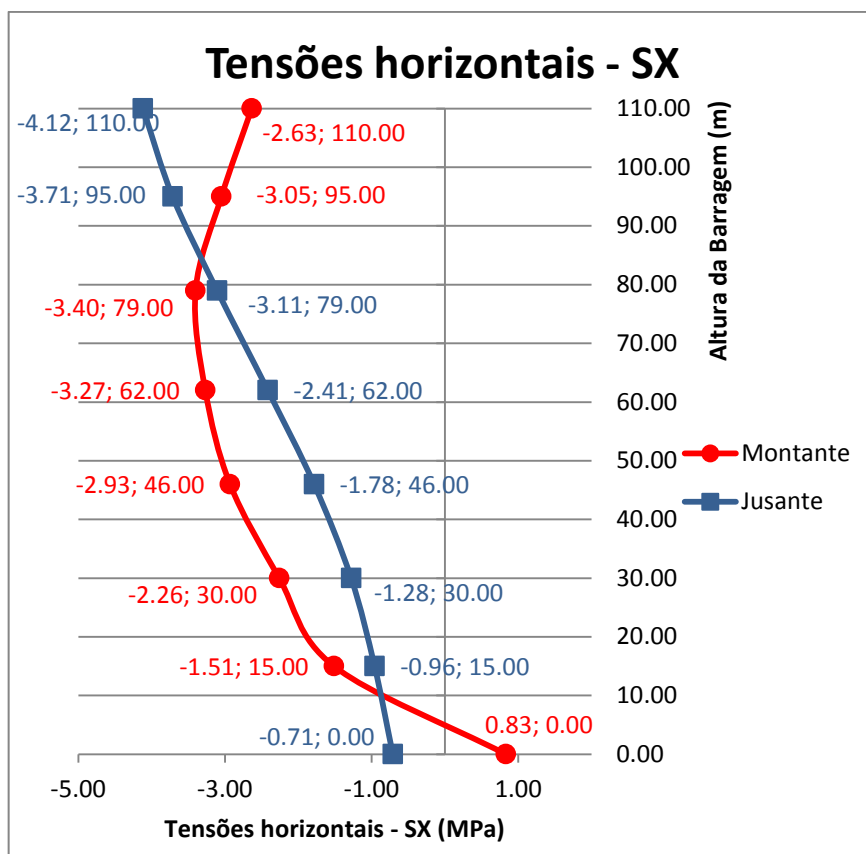


Gráfico 22 – Tensões horizontais, na junta central, devido à combinação das ações PP+PH

7.5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS DAS 3 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

De acordo com os resultados obtidos nas três combinações de ações realizadas,

- combinação 1: PP (com juntas abertas) + PI (com estratégia de injeção 3);
- combinação 2: PP (com juntas abertas) + PI (com estratégia de injeção 3) + PH (em NMC);
- combinação 3: PP (com juntas fechadas) + PH (em NMC).

conclui-se que, pela análise do gráfico 23 e 24, a combinação 1, origina deslocamentos radiais em direção a montante, e consequentemente trações no pé de jusante da barragem e compressões a montante. Ao invés, a combinação 2 e 3 originam deslocamentos radiais a jusante, e consequentemente trações no pé de montante da barragem e compressões a jusante. Assim, torna-se evidente que independentemente da estratégia de injeção adotada, a influência da pressão hidrostática, para níveis elevados de enchimento da albufeira, é a ação mais preponderante.

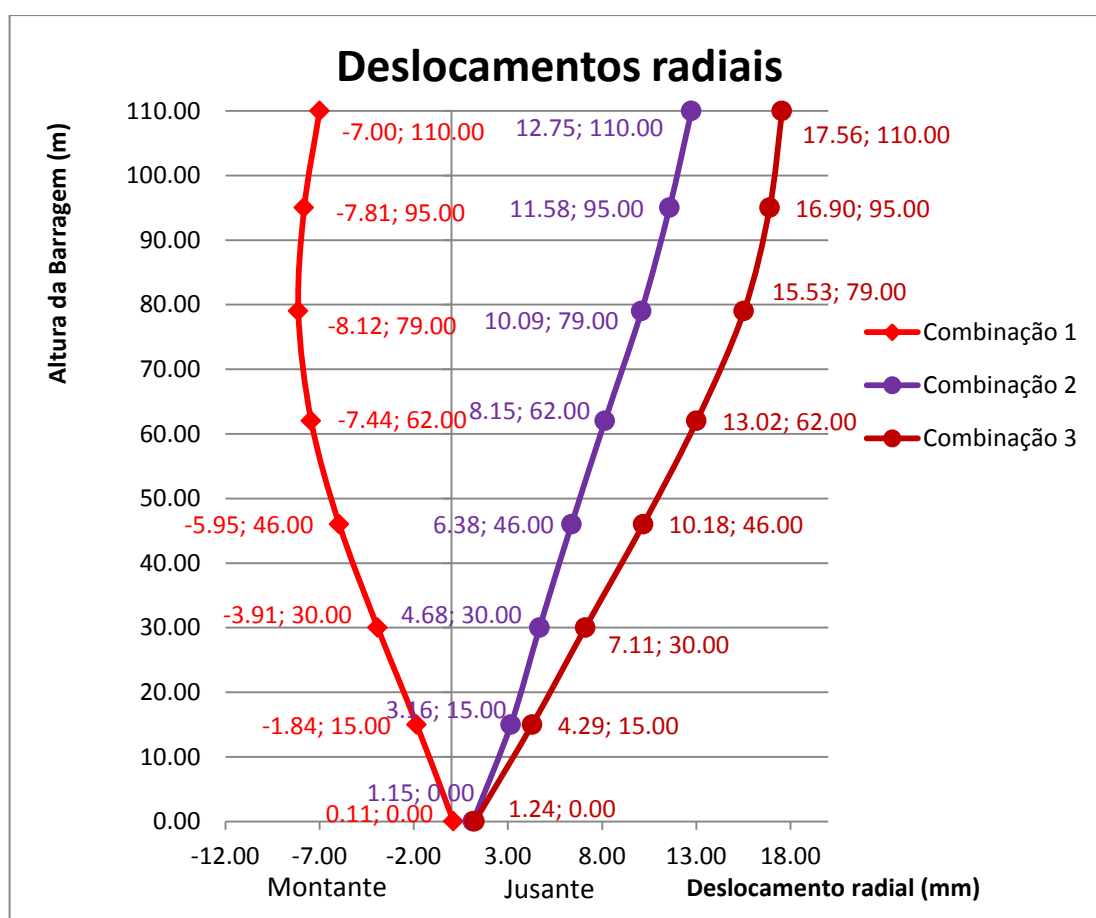


Gráfico 23 – Deslocamento radial da junta central, no paramento de montante, devido às combinações de ações

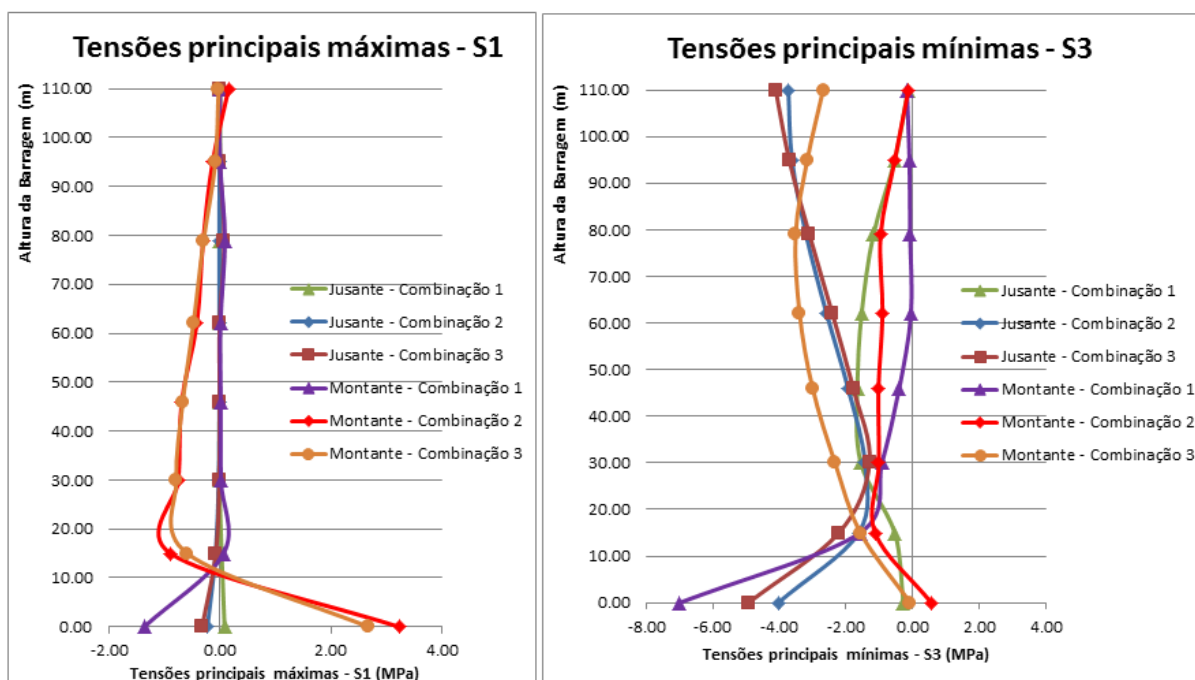


Gráfico 24 – Tensões principais máximas e mínimas, na junta central, a jusante e montante devido às 3 combinações de ações (MPa)

A relação entre a coordenada X do desenvolvimento do coroamento e os deslocamentos que ocorrem nessa zona da barragem para a combinação 3, é representada no gráfico 25.

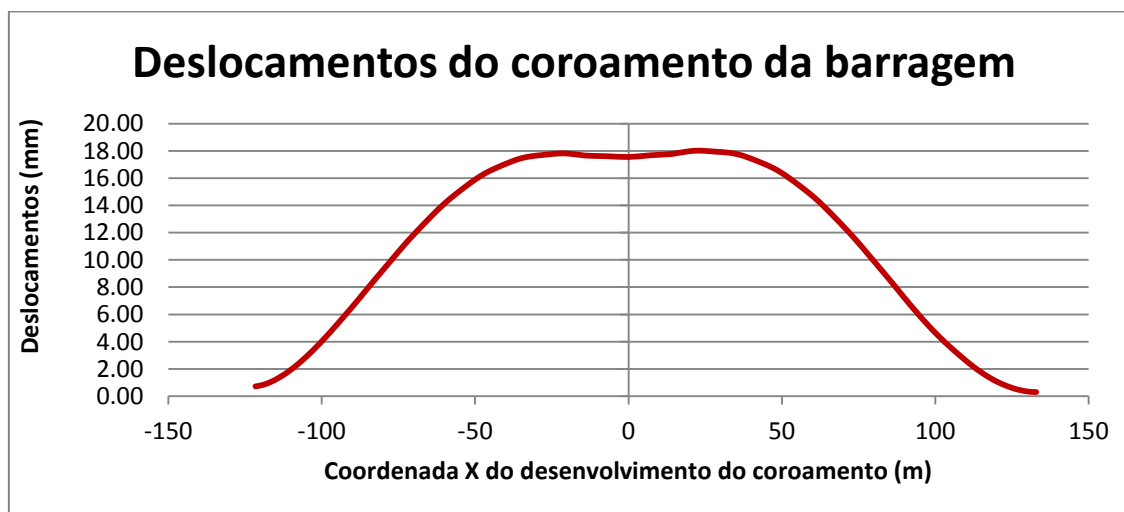


Gráfico 25 – Deslocamento no coroamento da barragem, no paramento de montante.

8

CONCLUSÃO

8.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi realizado com o objetivo de analisar o processo de injeção das juntas de contração de barragens abóbada. Tornou-se como exemplo a Barragem do Alto Lindoso, para a qual se procedeu à sua modelação e se desenvolveu uma metodologia de cálculo, simulando o processo de injeção de juntas e considerando quer a ação do peso próprio, quer a ação da pressão hidrostática para diferentes níveis de enchimento da albufeira, através do programa ANSYS. O processo de injeção de juntas de contração da barragem em causa foi analisado com base em cinco estratégias diferentes de injeção, tendo sido analisadas as pressões da injeção das juntas, os deslocamentos radiais, os valores das tensões principais máxima e mínima, bem como as tensões horizontais no arco e verticais instaladas no corpo da barragem.

O presente trabalho, foi organizado de forma a permitir ao leitor adquirir conceitos e informações técnicas importantes, para ter a plena capacidade de compreender o processo de realização e análise dos resultados obtidos no modelo da barragem em estudo, bem como informações extra, que se consideraram de interesse incorporar no trabalho para abranger um maior leque de assuntos relacionados. Os assuntos referidos, são por exemplo, o processo de refrigeração dos betões em barragens de betão, que tem o objetivo de controlar e reduzir a temperatura do betão ocorrida ao longo do seu processo construtivo, proporcionando condições para a execução das injeções das juntas de contração, tendo-se abordado as causas das variações térmicas que ocorrem em barragens e os métodos de arrefecimento artificial do betão. Foi efetuada uma exposição detalhada dos principais tipos estruturais de barragens e suas subclassificações, foram caracterizadas as ações/solicitações que podem atuar no conjunto barragem-fundação e descritas genericamente as técnicas de construção de barragens com betões convencionais e betões compactado com cilindros. Além destes temas, foram definidas as equações analíticas genéricas da geometria de barragens abóbada e no capítulo precedente à modelação da barragem pelo Método dos Elementos Finitos, foi efetuada a formulação dos elementos sólidos tridimensionais de 8 e 20 nós e dos elementos finitos de junta de 4 e 8 nós, que foram utilizados na modelação da barragem e nas análises efectuadas.

O programa desenvolvido, tornou-se de extrema importância, visto que, permitiu implementar de forma automática o modelo da barragem e o processo de cálculo pretendido. Ao longo do desenvolvimento deste programa, foi necessário utilizar diferentes software e ferramentas, como por exemplo, Microsoft Excel 2010, Visual Basic for Applications, AutoCAD 2014, ANSYS 14.5, Notepad++, para se conseguir atingir o objetivo pretendido. Assim, o programa está aparentemente preparado para ser utilizado na modelação de qualquer barragem.

Os três modelos implementados, corresponderam de forma semelhante às ações a que foram requeridas, apresentando resultados idênticos. Salienta-se que, a escolha das pressões de injeção e a metodologia usada para a sua aplicação e para a aplicação da pressão hidrostática, conduziram a resultados satisfatórios, tendo sido possível comparar parte deles, com os obtidos no anteprojecto da barragem realizado pela EDP e em estudos elaborados pelo LNEC. A estratégia utilizada neste trabalho para realizar o processo de injeção das juntas de contração da Barragem do Alto Lindoso, foi devidamente estudada e analisada, tendo-se concluído que entre as cinco estratégias de injeção, a estratégia 3 é a que apresenta melhores resultados. Esta estratégia, apresenta o menor valor das tensões de tração na base da barragem no paramento de jusante; as tensões de compressão são idênticas às tensões das restantes estratégias, no paramento de montante; relativamente ao efeito de arco, esta estratégia, apresenta valores semelhantes às outras estratégias de injeção; possui o menor valor dos deslocamentos obtidos no topo da junta central da barragem.

Analisaram-se três combinações de ações envolvendo o peso próprio, a pressão de injeção e a pressão hidrostática.

Na combinação do peso próprio (com juntas abertas) e da pressão de injeção, verifica-se a ocorrência de tensões de tração em praticamente todo o paramento de jusante da barragem. No paramento de montante, verifica-se que as tensões de compressão aumentam à medida que se vai aproximando do pé da barragem, atingindo o máximo valor nesta zona. Este aumento de tensão na base de montante da barragem é natural, devido à inclinação dos blocos da barragem. Relativamente às tensões horizontais na direção dos arcos, constata-se, que toda a espessura da barragem está sujeita a tensões de compressão. Através do efeito de arco, as barragens abóbadas, conseguem distribuir a maioria dos esforços, para o maciço de fundação lateral, permitindo desta forma usar as propriedades mecânicas do betão à compressão da melhor maneira.

Na combinação do peso próprio (com juntas abertas), da pressão de injeção e da pressão hidrostática, considerando a albufera no NMC, ocorrem tensões de compressão em todo o paramento de jusante, aumentando em direção ao coroamento e ao pé de jusante da barragem. No paramento de montante, é de salientar, o aparecimento de tensões de tração na zona junto ao maciço de fundação e de compressões no restante paramento. Com base nos resultados dos estados de tensão e deformação da estrutura, torna-se evidente que a ação da pressão hidrostática, é condicionante.

Na combinação do peso próprio (com juntas fechadas) e a pressão hidrostática, constata-se que, devido ao facto da pressão hidrostática exercer pressões no paramento de montante, com sentido e direção para jusante, surgem, na zona de contacto da barragem com o maciço de fundação, tensões de tração a montante e compressões a jusante. Genericamente, o comportamento apresentado pela estrutura, para esta combinação de ações, assemelha-se ao comportamento registado na combinação 2, embora com deslocamentos e tensões de valor superior.

8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O processo de injeção de juntas de contração é um tema de extrema importância na construção de uma barragem, e a partir desta dissertação, poderão surgir diferentes e muito interessantes casos de estudo, abrangendo esta e outras áreas relacionadas.

- Seria interessante proceder à realização de todo o processo de cálculo utilizado para esta barragem, noutras barragens abóbada, e verificar se a estratégia de injeção adotada neste trabalho (estratégia de injeção 3), continua a ser vantajosa.

- Através do programa desenvolvido, seria vantajoso, incorporar no seu processo de cálculo, o efeito da variação da temperatura.
- No sentido de obter resultados mais satisfatórios, seria conveniente efetuar um estudo de otimização e variação das pressões de injeção, de acordo com as estratégias propostas.
- Num dos capítulos do trabalho é feita uma ligeira abordagem ao processo de refrigeração dos betões de barragens de betão, e como tal, seria conveniente em desenvolvimentos futuros, realizar-se uma análise mais aprofundada sobre este processo, simulando-o.

BIBLIOGRAFIA

- ACI Materials Jornal. (1997). *Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*. American Concrete Institute Committee 211.3R-97.
- ACI Materials Jornal. (1999). *Roller Compacted Mass Concrete*. American Concrete Institute Committee 211.3R-97.
- ANSYS (2013). Ansys®/Multiphysics, Inc. Company.
- Azevedo, A. (2003). *Método dos Elementos Fintos*. Sebenta de Análise Avançada de Estruturas da FEUP, Abril de 2003, 1ª Edição, Portugal.
- Bathe, K. (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Batista, A. (1998). *Análise do comportamento ao longo do tempo de barragens abóbada*. Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Batista, A., Ramos, J., Pina, C., Castro, A. (1995). *Análise de comportamento estrutural de uma barragem abóbada durante o primeiro enchimento da albufeira*. LNEC, Lisboa.
- Bofand, Z. (2003). *Temperature control and design of joints for RCC arch dams*. Roller Compacted Concrete Dams, Proceedings of the Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams (Berga et al., eds. Lit.), 17-19 November 2003, Madrid, pages 409-415, Swets & Zeitlinger, Lisse.
- Concrete construction staff (1992). <http://www.concreteconstruction.net/concrete-articles/friction-factor-for-concrete-on-concrete.aspx> (28/06/2013)
- Delgado, R. (1984). *O método dos elementos finitos na análise dinâmica de barragens incluindo a interação sólido-líquido*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Decreto-Lei n.º 445/89 (1989). Diário da República, 1ª Série - n.º299 de 30-12-1989. *Regulamento de betões de ligantes hidráulicos*. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, 30-12-1989, Portugal, Lisboa.
- Decreto-Lei n.º 344/2007 (2007). Diário da República, 1ª Série – n.º 213/93 de 15-10-2007. *Regulamento de Segurança de Barragens*. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Portugal, Lisboa.
- EDP (1977a). *Aproveitamento hidroeléctrico do Alto Lindoso*. Anteprojeto do Escalão do Alto Lindoso.
- EDP (1977b). *Lâminas e dispositivos para injeção primária de uma junta tipo*. Anteprojeto do Escalão do Alto Lindoso.
- EDP (1977c). *Definição*. Anteprojeto do Escalão do Alto Lindoso.
- EDP (1977d). *Descargas de fundo*. Anteprojeto do Escalão do Alto Lindoso.
- EDP (1977e). *Perfis pelas juntas*. Anteprojeto do Escalão do Alto Lindoso.
- EDP (1977f). *Esquema da aparelhagem de observação instalada na junta 8*. Anteprojeto do Escalão do Alto Lindoso.
- EDP (1992). Injeção das juntas de contração. In *Relatório da Empreitada de tratamento da fundação e injeção das juntas de contração da barragem e injeções nos descarregadores de cheia do Escalão do Alto Lindoso*. Janeiro 1992, Lisboa.

EDP (2007a). Injecção das juntas da barragem e da ensecadeira abobada do escalão de montante. In *Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor*, Empreitada Geral de Construção – Caderno de Encargos, 217 – 233.

EDP (2007b). Refrigeração artificial da barragem de montante. In *Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor*, Empreitada Geral de Construção – Caderno de Encargos, 234 – 250.

EDP (2008). *Refrigeração Artificial da Barragem de Montante do Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor*. Estudo Prévio da Barragem do Baixo Sabor.

Genésio, M. (1993). *Simulação do comportamento de juntas de barragens*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11930/2/Texto%20integral.pdf> (20/02/2013)

Gaixin, C., Guojin, J., Guoxing, H. (2003). *Repeated joint-grouting Roller Compacted Concrete arch dam*. In: “Roller Compacted Concrete Dams”, Proceedings of the Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams (Berga et al., eds. lit.), 17-19 November 2003, Madrid, pages 421 - 426, Swets & Zeitlinger, Lisse

Golzé, A. (1977). *Handbook of Dam Engineering*. Van Nostrand Reinhold Co., Canada.

Herzog, M. (1989). *Influência das juntas de contracção no comportamento estático de barragens abóbada*. LNEC, Lisboa.

INAG (2002). *Curso de exploração e segurança de barragens*.

Inoue, G. (1986). *Medida preventivas de controle da temperatura que induz fissuração no concreto massa*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. http://publicacoes.pcc.usp.br/PDF/BTs_Petreche/BT07-%20Inoue.pdf (08/05/2013)

Jesus, J. (2009). *Barragens abóbada em betão compactado com cilindros*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59499/1/000136751.pdf> (27/02/2013)

Lança, R. (1997). *Tipologias, condicionamento e ações em barragens de aterro*. Projeto de investigação aplicada em construção – Capítulo III, Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve, Algarve. <http://w3.ualg.pt/~rlanca/piac/piac-03-tipo-accoes.pdf> (26/06/2013)

Lemos, V. (1998). *Development of an arch dam analysis module for the program 3DEC*. LNEC.

LNEC (1993a). *Água de amassadura para betões. Caraterização e verificação da conformidade*. Especificação LNEC – E 372-1993. Maio 1993, Lisboa.

LNEC (1993b). *Inertes para argamassas e betões. Caraterísticas e verificação da conformidade*. Especificação LNEC – E 373-1993. Maio 1993, Lisboa.

NP EN 197-1 (2001a). *Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 197-2 (2001b). *Cimento – Parte 2: Avaliação da conformidade*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 934-4 (2009). *Adjuvantes para betão, argamassa e calda de injeção - Parte 4: Adjuvantes para as caldas de injeção para bainhas de pré-esforço. Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

- Marques, T. (2008). *Estudo de um betão compactado com cilindros – Aplicado a barragens*. Tese de Licenciatura, Faculdade de Ciências e Tecnologia. http://run.unl.pt/bitstream/10362/1833/1/Marques_2008.pdf (30/05/2013)
- Meliço, J. (2010). *Escolha de formas de barragens abóbada*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. <http://run.unl.pt/handle/10362/5114> (27/02/2013)
- Miranda, M., Matos, D., Pimentel, R., Gomes, A. (2012). *The Baixo Sabor Upstream and Downstream Dams. Relevant design and construction features*. 54º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2012 – 54CBC (IBRACON), 8-11 Outubro 2012, Maceió, 1 – 16.
- Miranda, M., Moura, G., Sousa, A. (1988). *Joint Grouting of Fronhas Dam*. Commission Internationale des Grands Barrages, San Francisco.
- Nagataki, S., Fujisawa, T., Kawasaki, H. (2008). *State of art RCC dams in Japan*, 1º Brazillian International RCC Symposium, Setembro 2008, Ibracon, Brasil.
- Oliveira, S. (2000). *Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo, formulações de dano*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/12411> (19/02/2013)
- Oliveira, S. (1991). *Elementos finitos parabólicos para análise estática e dinâmica de equilíbrios tridimensionais*. Trabalho de síntese, LNEC, Lisboa.
- Paixão, J., Matos, D. (2012). *Shape Optimization in the Design of Concrete Arch Dams – Two Case Studies*. 10th World Congress on Computational Mechanics, 8-13 Julho 2012, São Paulo.
- Pedro, J.O. (1977). *Dimensionamento das barragens abóbada pelo método dos elementos finitos*. LNEC, Tese para especialista, Lisboa.
- Portaria n.º 846/93 (1993). Diário da República, 1ª Série B - nº 213/93 de 1993-09-10. *Normas de Projecto de Barragens*. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Portugal, Lisboa.
- Portaria n.º 246/98 (1998). Diário da República, 1ª Série B - nº 93 de 21-04-1998. *Normas de Construção de Barragens*. Ministério da Defesa Nacional, da Administração Interna, do Equipamento, do Planeamento e da Administração do Território, da Economia, da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas e do Ambiente, Portugal, Lisboa.
- Qiuhua, C. (2003). *New design method of RCC high arch dam*. In: “Roller Compacted Concrete Dams”, Proceedings of the Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams (Berga et al., eds. lit.), 17-19 November 2003, Madrid, pages 427 - 430, Swets & Zeitlinger, Lisse
- Ramos, J.M., Batista, A.L., Castro, A.T. (1994). *Observação da barragem do Alto Lindoso durante o primeiro enchimento da albufeira*. Parecer relativo ao comportamento observado até ao último patamar (nível da água à cota 338,0 m). Relatório 36/1995, Dezembro de 1994.
- Rydzewski, J. (1965). *Theory of Arch Dams*. Elsevier Science & Technology, Oxford.
- Sagrado, J. (2008). *Materiais, Dosagem e Técnicas de Controlo de Qualidade do CCR em Barragens Espanholas*, 1º Brazillian International RCC Symposium, Ibracon, Brasil, Setembro 2008.
- Sociedade de Construções Soares da Costa, Lda. *Arrefecimento com Água Refrigerada de Betões na Barragem de Montante do Escalão do Baixo Sabor*. Estudo Prévio.

Teles, M. (1985). *Comportamento térmico de barragens de betão*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/11515> (21/02/2013)

U.S. Army Corps of Engineers (1994). *Arch Dam Design* – Engineer Manual N° 1110-2-2201. Department of the U. S. Army Corps of Engineers, Washington. http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/EM_1110-2-2201/EM_1110-2-2201.pdf (01/03/2013)

U.S. Army Corps of Engineers (2000). *Roller - Compacted Concrete*. Engineer Manual N° 1110-2-2006. Department of the U. S. Army Corps of Engineers. 15 January 2000.

United States Department of the Interior. Bureau of Reclamation (1977b). *Design of Arch Dam – Design Manual for Concrete Arch Dams*. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado. http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/manuals/ArchDams.pdf (01/03/2013)

WEBSITES CONSULTADOS

<http://portugalfotografiaaerea.blogspot.pt/2012/08/barragem-do-alto-lindoso.html> (07/03/2013)

http://www.a-nossa-energia.edp.pt/pdf/desempenho_ambiental/da_18_2010_dir_prod_hid.pdf (07/03/2013)

http://cnpgb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/AltoLindosodes.htm (07/03/2013)

http://cnpgb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/Agueira.htm (16/04/2013)

http://cnpgb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/Cabril.htm (16/04/2013)

http://cnpgb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/CastelodoBode.htm (16/04/2013)

http://cnpgb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/Pracana.htm (16/04/2013)

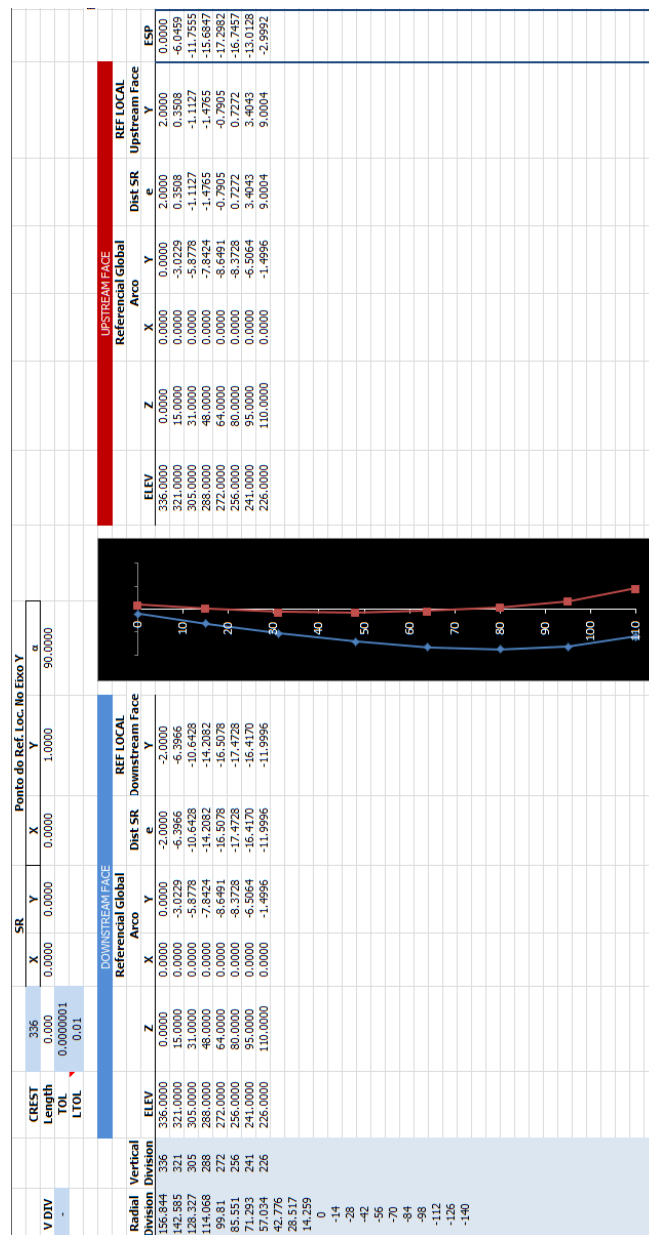
http://cnpgb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/Torrao.htm (16/04/2013)

http://dc426.4shared.com/doc/1HvI_C4a/preview.html (16/04/2013)

ANEXOS

A1

Definição da geometria da consola central pelo Microsoft Excel 2010



Definição da consola central da Barragem do Alto Lindoso pelo programa Excel 2010

A2

Main.apdl do modelo da Barragem do Alto Lindoso

! ANSYS CONTACT EXERCISE

finish

/Clear, Start

MODEL='model3'

! PP=model1; INJ=model2; PH=model3

RESUME=1

! RESUME DATABASE MODEL

DBFILE='dambricks'

! DATABASE MODEL FILE

!DBFILE='damtetrahedron'

! DATABASE MODEL FILE

!DBFILE='damtetrahedronref'

! DATABASE MODEL FILE

*if,RESUME,eq,0,then

/Input, .\01.Model\%MODEL%\model.apdl

!INPUT MODEL

/Input, .\01.Model\%MODEL%\wplane.apdl

!INPUT WPLANE

/Input, .\01.Model\%MODEL%\comp.apdl

!INPUT COMPONENTS

/Input, .\01.Model\%MODEL%\glue.apdl

!INPUT GLUE

/Input, .\01.Model\%MODEL%\material.apdl

!INPUT MATERIALS

/Input, .\01.Model\%MODEL%\elements.apdl

!INPUT ELEMENTS

/Input, .\01.Model\%MODEL%\parameters.apdl

!INPUT PARAMETERS

/Input, .\01.Model\%MODEL%\modeladjust.apdl

!INPUT MODEL ADJUSTAMENT SCRIPT

/Input, .\02.Mesh\%MODEL%\mesh3.apdl

!INPUT MESH

*else

RESUME, %DBFILE%,db,

*endif

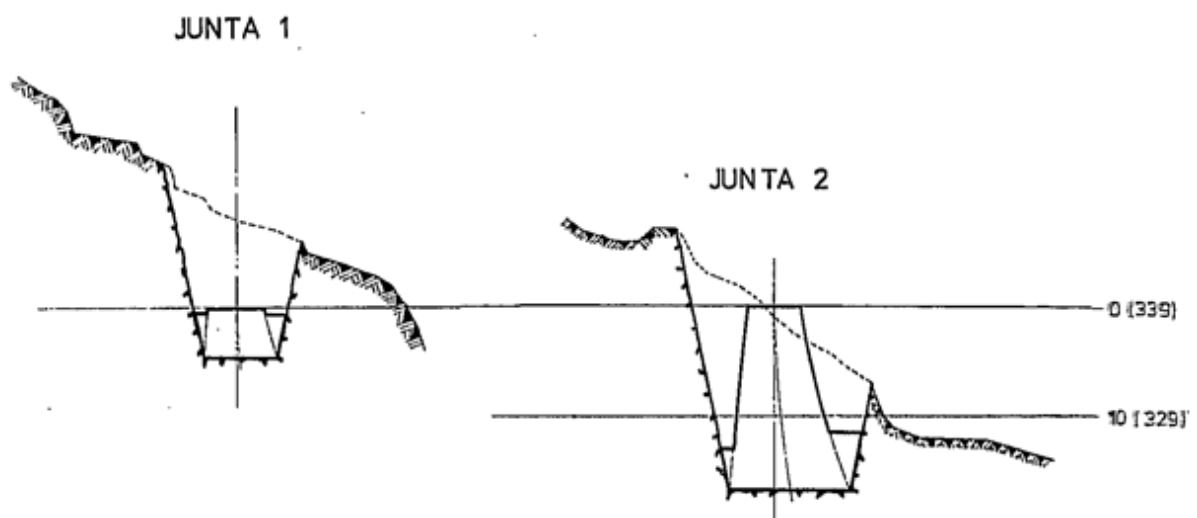
! SOLUTION

/Input, .\03.Solve\%MODEL%\solve.apdl

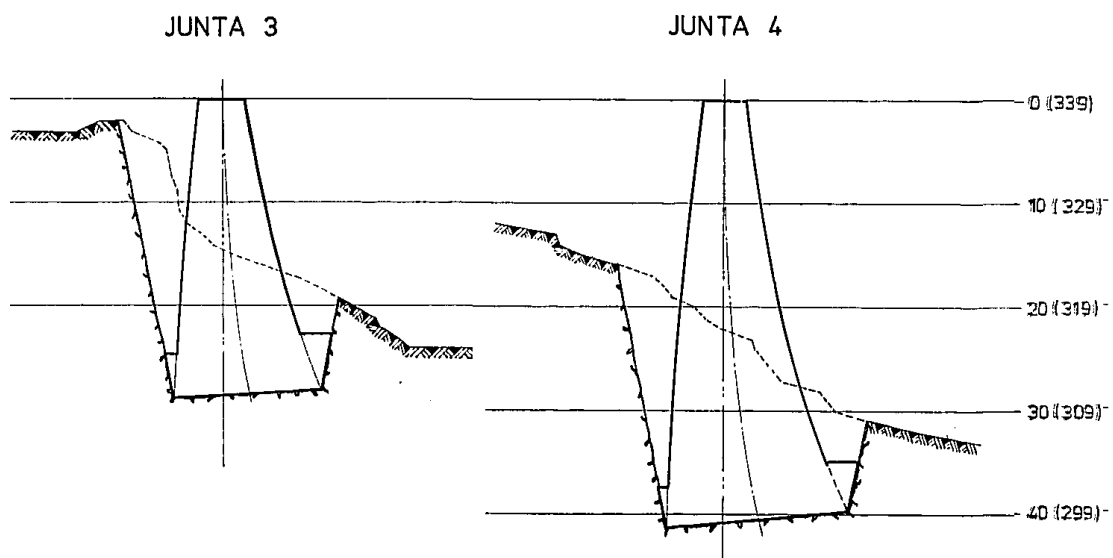
!INPUT SOLVE

A3

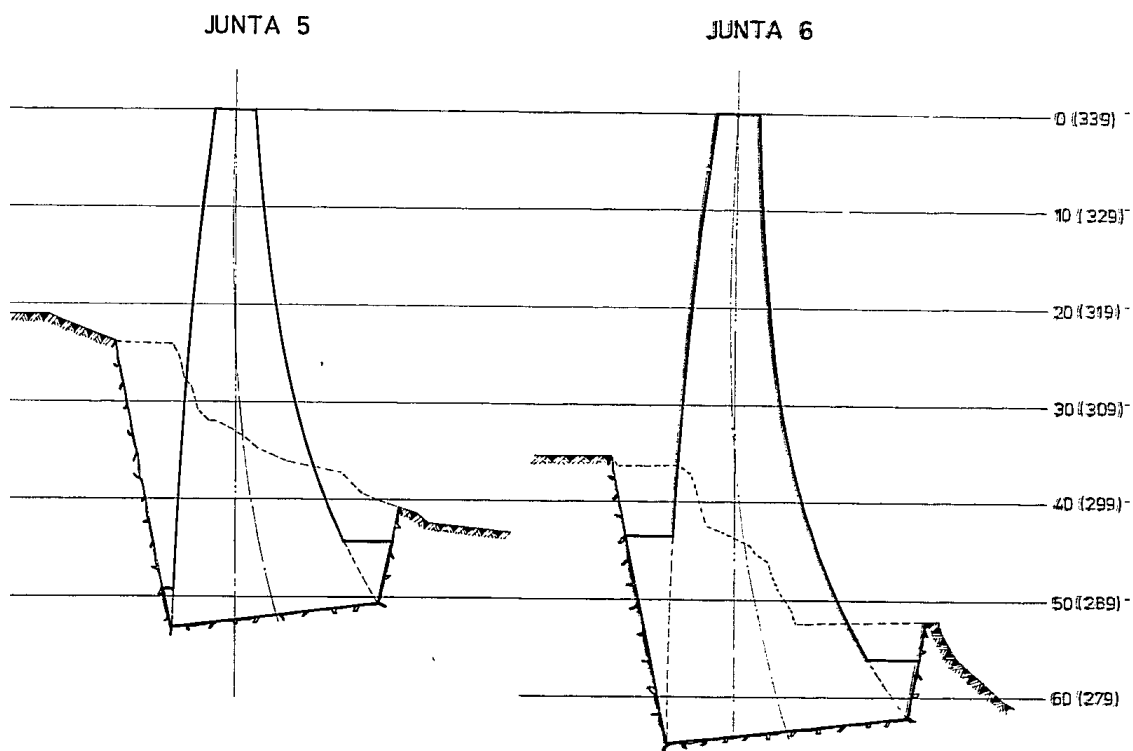
Perfil das juntas da Barragem do Alto Lindoso



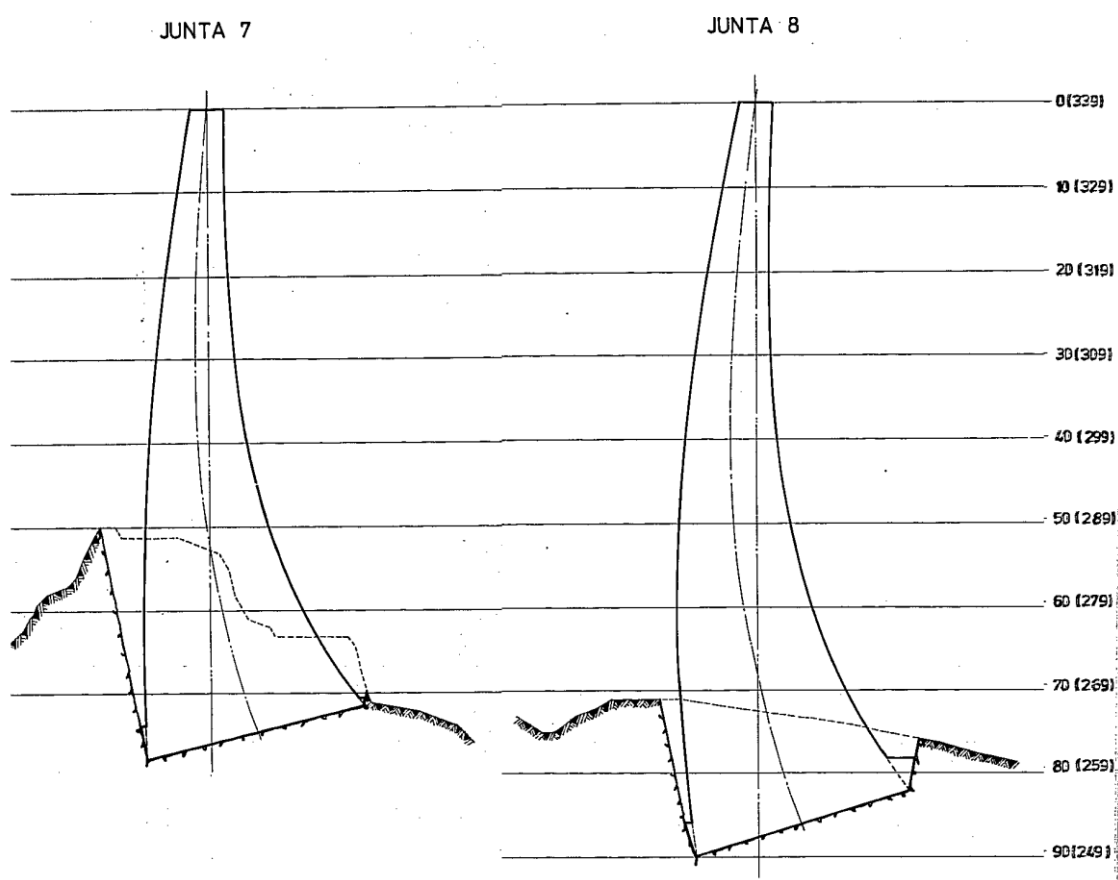
Perfis das juntas 1 e 2 da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977e)



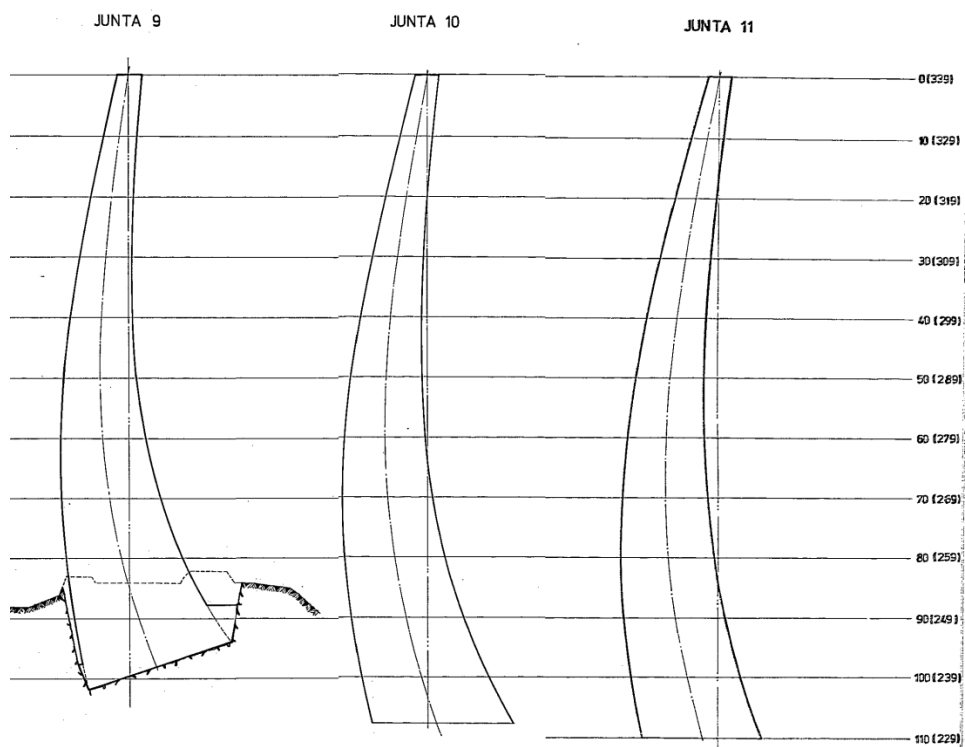
Perfis das juntas 3 e 4 da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977e)



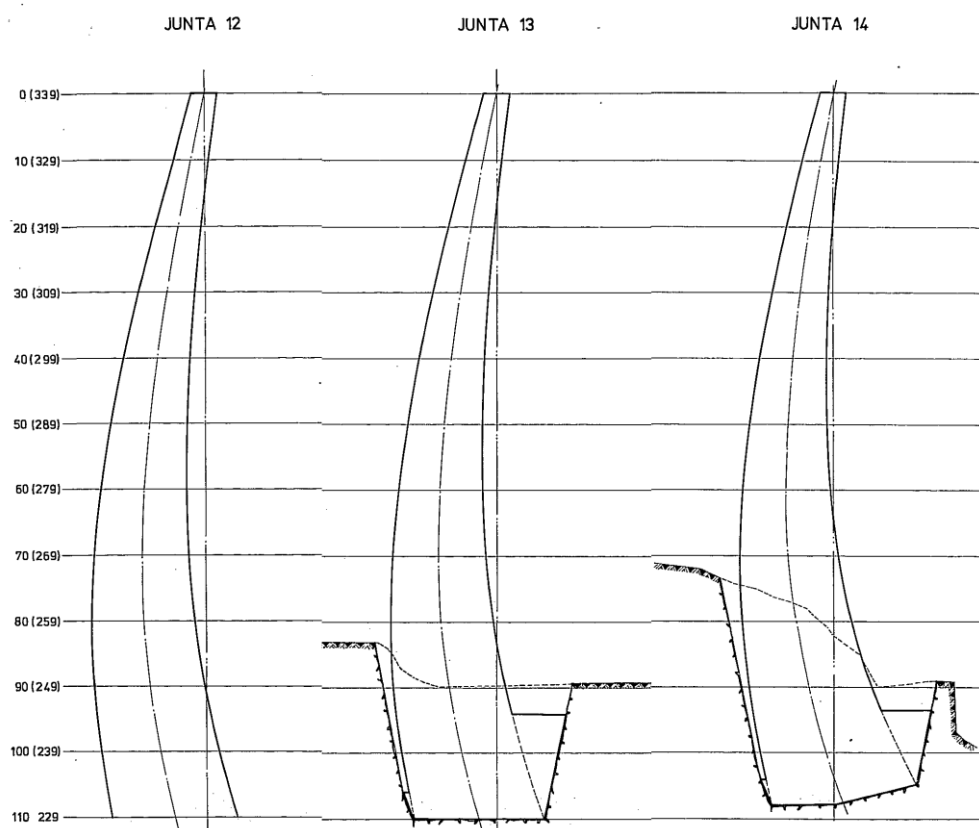
Perfis das juntas 5 e 6 da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977e)



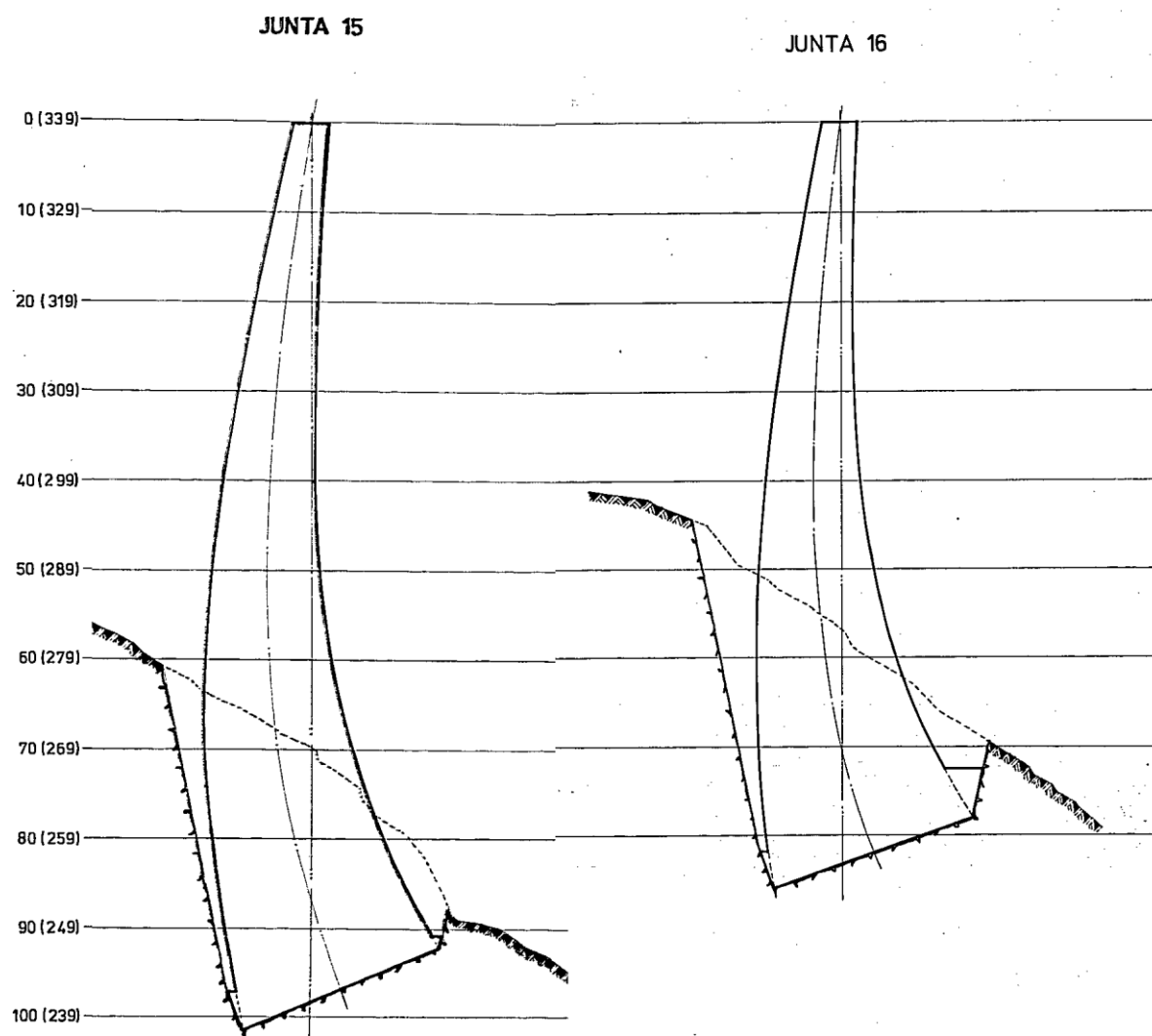
Perfis das juntas 7 e 8 da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977e)



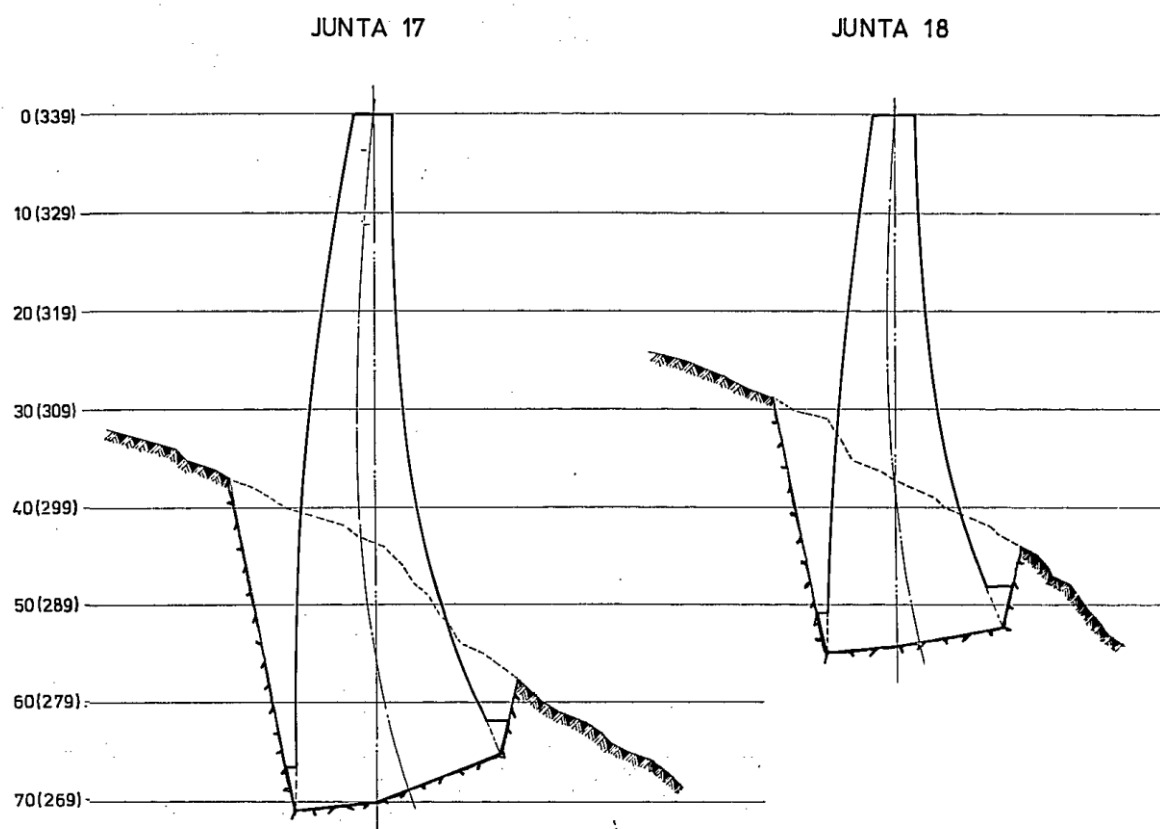
Perfis das juntas 9, 10 e 11 da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977e)



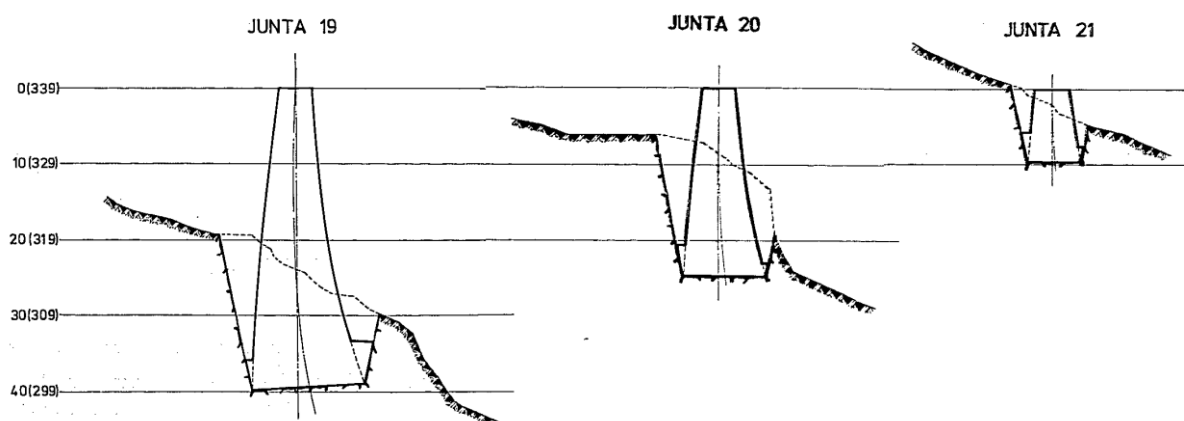
Perfis das juntas 12, 13 e 14 da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977e)



Perfis das juntas 15 e 16 da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977e)



Perfis das juntas 17 e 18 da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977e)



Perfis das juntas 19, 20 e 21 da Barragem do Alto Lindoso (EDP, 1977e)